UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DANILO CAMARGO DE SOUZA FILHO

COMPARAÇÃO ENTRE DOIS TRATAMENTOS TÉRMICOS ENVOLVENDO A PIRÓLISE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

OURO PRETO - MG
2022

DANILO CAMARGO DE SOUZA FILHO
danilo.filho@aluno.ufop.edu.br

COMPARAÇÃO ENTRE DOIS TRATAMENTOS TÉRMICOS ENVOLVENDO A PIRÓLISE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Edson Alves Figueira Júnior

OURO PRETO – MG
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F481c Filho, Danilo Camargo de Souza.
Comparação entre dois tratamentos térmicos envolvendo a pirólise de resíduos sólidos urbanos. [manuscrito] / Danilo Camargo de Souza Filho. - 2022.
48 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves Figueira Júnior.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Sustentabilidade - Resíduos sólidos urbanos. 2. Gás - Gaseificação a plasma. 3. Tratamento térmico - Pirólise lenta. 4. Gás - Gás de síntese. 5. Energia elétrica. I. Júnior, Edson Alves Figueira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Danilo Camargo De Souza Filho

Comparação entre dois tratamentos térmicos envolvendo a pirólise de resíduos sólidos urbanos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro mecânico

Aprovada em 04 de outubro de 2022

Membros da banca

[DSc] - Edson Alves Figueira Júnior - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
[PhD] - Elisângela Martins Leal - Universidade Federal de Ouro Preto
[DSc] - José Francisco Vilela Rosa - Universidade Federal de Ouro Preto

Edson Alves Figueira Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/10/2022

Documento assinado eletronicamente por **Edson Alves Figueira Junior**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/10/2022, às 09:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Elisangela Martins Leal**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/10/2022, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Jose Francisco Vilela Rosa**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/10/2022, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0417000** e o código CRC **30704DB5**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

A Deus dedico mais esta etapa vencida.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador Edson Alves Figueira Júnior, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

A minha família e minha namorada pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos de Ouro Preto por toda ajuda e suporte.

“Se fosse fácil achar o caminho das pedras, tantas pedras no caminho não seriam ruim”.

Humberto Gessinger

RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos são prejudiciais para a sociedade e para o meio ambiente quando descartados de maneira inadequada. Devido a isso, surgiram ao longo dos anos, tecnologias capazes de tratar esses resíduos e descartá-los de maneira correta. Dentre os métodos existentes, dois se destacam pela capacidade de gerar energia elétrica a partir do tratamento térmico dos resíduos, sendo eles: Pirólise lenta a tambor rotativo e plasma pirólise. Portanto, este trabalho tem como objetivo comparar os dois processos em termos de eficiência energética. Para alcançar tal objetivo, foi utilizado dois artigos, sendo um sobre o projeto da usina de pirólise lenta a tambor rotativo de Boa Esperança (MG) e, o outro, acerca da planta piloto situada na cidade de Mauá (SP) - também foi usada uma tese de doutorado onde foi feita uma modelagem para dimensionamento de um gaseificador a plasma e um estudo de caso para a cidade de São Paulo (SP). Foi encontrado que o sistema de pirólise lenta tem um saldo positivo na geração de energia, ou seja, produz 1500 kW de energia elétrica, porém, consome apenas 200 kW (cerca de 14%), enquanto que o sistema de plasma pirólise não é capaz de suprir a sua demanda energética, produzindo cerca de 3741 kW em sua melhor configuração e necessitando de 7476 kW para seu funcionamento (saldo negativo). Contudo, o sistema de plasma pirólise se mostrou mais versátil, o que demonstrou ser capaz de queimar outros tipos de resíduos (como os resíduos sólidos de saúde), e da não necessidade de tratar previamente os mesmos, além de ser mais economicamente viável a longo prazo que os métodos empregados atualmente para tratamento de resíduos sólidos de saúde. Portanto, os dois métodos mostraram-se eficientes, sendo o de pirólise lenta no quesito de geração de energia elétrica e o de plasma pirólise na questão da adaptabilidade ao insumo a ser queimado. Assim, ambos apresentaram emissões de poluentes em níveis abaixo do estabelecido pela norma brasileira, sendo considerados ecologicamente sustentáveis e duas ótimas alternativas para o tratamento e descarte de resíduos gerados em centros urbanos.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Gaseificação a plasma. Pirólise lenta. Gás de síntese. Energia.

ABSTRACT

Municipal solid waste are harmful to society and the environment when inappropriately disposed, due to this, technologies capable of treating this waste and disposing of it correctly have emerged over the years. Among the existing methods, two stand out for their ability to generate electrical energy from the burning of waste: Slow pyrolysis with a rotating drum and plasma pyrolysis. Therefore, this work aims to analyze the two processes and evaluate the efficiency results in energy generation. To achieve the objective, two articles were used, one about the project of the slow pyrolysis plant with rotating drum of Boa Esperança (MG) *and the other one about the pilot plant located in the city of* Mauá (SP)*, a doctoral thesis was also used where a modeling was made for dimensioning a plasma gasifier and a case study for the city of* São Paulo (SP). *It was found that the slow pyrolysis system has a positive balance in energy generation, that is, it produces 1500 kW of electricity, but consumes only 200 kW (about 14%), while the plasma pyrolysis system is not able to supply its energy demand, producing about 3741 kW in its best configuration, however it needs 7476 kW for its operation (negative balance). However, the plasma pyrolysis system proved to be more versatile, being able to burn other types of waste (such as health) and without the need to previously treat them, in addition to being more economically viable in the long term than the methods used to treatment of solid health waste. Therefore, both methods are efficient, being the slow pyrolysis method in terms of electricity generation and the plasma pyrolysis method in terms of adaptability to the input to be burned. Thus, as the two also presented pollutant emissions at low levels and within the norms, they can be considered ecologically sustainable, being two great alternatives for the treatment and disposal of waste generated in urban centers.*

Key-words: Municipal solid wastes. Plasma gasification. Slow pyrolysis. Syngas. Energy.

LISTA DE SIMBOLOS

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
CDR	Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
NBR	Norma Brasileira
MWh	Mega Watt Hora
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Nº.	Número
Art.	Artigo
kg/hab/dia	Quilograma Por Habitante Por Dia
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
NR	Norma Regulamentadora
SIG	Sistema de Informação Geográfica
Fluffing	Afofando
Fluff	Penugem
°C	Graus Celsius
Flash	Instantâneo
$CaCO_3$	Calcário
SO_2	Dióxido de Enxofre
$CaSO_2$	Sulfito de Cálcio
H_2S	Ácido Sulfídrico
HCl	Ácido Clorídrico
HF	Ácido Fluorídrico
Syngas	Gás de Síntese

Flare	Chaminé Com uma Válvula Regulamentadora de Pressão
PLTR	Pirólise Lenta a Tambor Rotativo
km	Quilômetros
mm	Milímetro
PCI	Poder Calorífico Inferior
MJ/kg	Megajoule por Quilograma
kg/m^3	Quilograma por Metro Cúbico
kg/h	Quilograma por Hora
kW	Quilowatt
m	Metro
Nm^3/h	Normal Metro Cúbico por Hora
SO_x	Óxidos de Enxofre
NO_x	Óxidos de Nitrogênio
$\dot{m}_{syngas}$	Vazão Mássica de Gás de síntese
$\dot{m}_{cinzas}$	Vazão Mássica de Cinzas
$\dot{m}_{calcário}$	Vazão Mássica de Calcário
$\dot{m}_{Gar}$	Vazão Mássica de Ar Necessário Para a Gaseificação
$\dot{m}_{Tar}$	Vazão Mássica Teórico de Ar Para a Combustão
ER	Razão de Equivalência
N_2	Nitrogênio
CO_2	Dióxido de Carbono
H_2	Hidrogênio
CH_4	Metano
C_2H_4	Etileno
O_2	Oxigênio
C_3H_8	Propano

C_2H_6	Etano
C_4H_{10}	Butano
C_5H_{12}	Pentano
C_6H_{14}	Ciclohexano
t/h	Toneladas por Hora
kWh	Quilowatt Hora
mg/Nm^3	Miligrama por Normal Metro Cúbico
ng/Nm^3	Nanograma por Normal Metro Cúbico
SMA	Secretaria do Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EUA	Estados Unidos da América
MG	Minas Gerais
SP	São Paulo
RSS	Resíduos Sólidos de Saúde
kcal/kg	Quilocaloria por Quilograma
MCI	Motor a Combustão Interna
CTG	Conjunto de Turbina a Gás
RDE	Rede de Distribuição de Eletricidade
kJ/kg	Quilojoule por Quilograma
MPa	Megapascal
α	Rendimento
$\alpha_{máximo}$	Rendimento Máximo
ΔH	Diferença de Entalpia
kg	Quilograma
l	Litros
kg/s	Quilograma por Segundo

kJ/kgK	Quilojoule por Quilograma Kelvin
payback	Retorno

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Disposição final de RSU no Brasil 1

Figura 2: Corte esquemático de um aterro sanitário 6

Figura 3: Disposição final de RSU no Brasil e regiões 7

Figura 4: Linha de separação de recicláveis 9

Figura 5: Esquema básico de um biodigestor 10

Figura 6: Esquema da unidade de triagem e compostagem de RSU 11

Figura 7: Diagrama processual de uma incineradora 13

Figura 8: Componentes de um sistema de gaseificação 14

Figura 9: Etapas do processo de PLTR 16

Figura 10: Etapas do processo 17

Figura 11: Esquema de uma usina de pirólise lenta a tambor rotativo 19

Figura 12: Componentes de uma usina a arco de plasma 22

Figura 13: Fluxograma de desenvolvimento do projeto 24

Figura 14: Desenho esquemático da usina de Boa Esperança - MG 27

Figura 15: Desenho esquemático da planta piloto de gaseificação 29

Figura 16: Vista frontal em corte do gaseificador a plasma 37

Figura 17: Modelos de tochas a plasma 38

Figura 18: Sistema integrado de um gaseificador a plasma e um motor de combustão interna 39

Figura 19: Sistema integrado de um gaseificador a plasma e um conjunto de turbina a gás ... 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das categorias de disposição de RSU 6

Tabela 2: Classificação de pirólises por tempo e temperatura 15

Tabela 3: Emissão do sistema de aquecimento do reator (em mg/Nm^3) 19

Tabela 4: Tabela de variáveis e indicadores 25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Formulação do Problema 1
1.2 Justificativa 2
1.3 Objetivos 3
1.3.1 Geral 3
1.3.2 Específicos 3
1.4 Estrutura do Trabalho 4

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil 5
2.2 Alternativas para o Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos 7
2.2.1 Tratamentos Mecânicos 8
2.2.2 Tratamentos Biológicos 10
2.2.3 Tratamentos Térmicos 12
2.3 Pirólise 15
2.3.1 Pirólise Lenta a Tambor Rotativo 16
2.3.2 Plasma Pirólise 19
2.4 Conclusão 22

3 METODOLOGIA 23
3.1 Tipo de Pesquisa 23
3.2 Materiais e Métodos 24
3.3 Variáveis e Indicadores 25
3.4 Instrumento de Coleta de Dados 25
3.5 Tabulação de Dados 25
3.6 Considerações Finais 25

4 RESULTADOS 26
4.1 Pirólise Lenta a Tambor Rotativo 26
4.1.1 Usina de Boa Esperança 26
4.2 Plasma Pirólise 35
4.2.1 Usina a Plasma Hipotética - Estudo de caso 35
4.3 Possibilidade de aplicação 43

5 CONCLUSÃO 45

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....47

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Sabe-se que é de conhecimento geral que a quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados diariamente, torna-se uma preocupação cada vez mais significativa para a sociedade (BERTO, 2020). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) somente em 2021, os centros urbanos brasileiros geraram cerca de 82,5 milhões de toneladas de RSU, sendo que, somente 92,2% deste montante foi feita a recolhida dos seus pontos de geração.

De acordo com a definição da PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº: 12.305 (2010), resíduo sólido urbano é qualquer resíduo originário de atividade doméstica (domiciliar), em residências urbanas ou, originário de varrição e limpeza de logradouros, além de vias públicas. Vale lembrar que, segundo a PNRS Art. 6º da Lei nº 11.445 (2007), resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços cuja responsabilidade pelo manejo não seja atribuída ao gerador, podem, por decisão do poder público, ser incluídas em tal classificação.

Ainda, segundo as normas brasileiras NBR8419 (1992) e NBR13896 (1997), os RSU deveriam ter, como destinação final, os aterros sanitários. Contudo, segundo a ABRELPE (2021), somente 60% tiveram essa destinação no ano de 2021, onde que, os 40% restantes foram dispostos em aterros controlados e lixões a céu aberto, conforme a Figura 1. Tal problemática resulta na contaminação do meio ambiente, além dos riscos à saúde pública (SZIGETHY e ANTENOR, 2020).

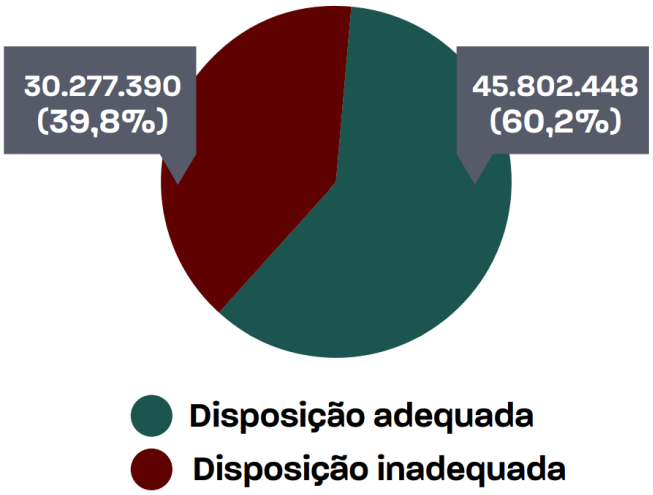

Figura 1: Disposição final de RSU no Brasil
Fonte: ABRELPE (2021)

Conforme a Figura 1, é possível afirmar que, quase 40% dos resíduos sólidos urbanos gerados ainda possuem destinação inadequada, sendo uma situação pela qual necessita-se maior atenção.

A fim de minimizar os efeitos de uma gestão e disposição irregular dos RSU, foram surgindo tecnologias e processos que tratam os resíduos sólidos com o objetivo de diminuir o volume e, além disso, suas massas (RAMOS et al, 2014). De acordo com Sipra *apud* Trovó (2021), os tratamentos mais comuns aplicados são: compostagem, autoclavagem, incineração e gaseificação. Ademais, de acordo com o autor, além do benefício de redução, alguns desses métodos podem produzir energia e, também, compostos utilizáveis em indústrias, o que torna-os em soluções rentáveis.

Portanto, este presente estudo visa estabelecer um paralelo entre o tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da pirólise lenta a tambor rotativo e, também, o processo de plasma pirólise, fazendo assim, um comparativo e, sobretudo, uma análise das subsequentes vantagens e desvantagens de ambos os métodos. Sendo assim, será utilizado como exemplo prático a usina de Boa Esperança - Minas Gerais - a qual implementou o processo de pirólise lenta a tambor rotativo, sendo pioneira em tal tecnologia no país. Com isso, tem-se a seguinte problemática:

Qual processo de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos é mais vantajoso: Pirólise lenta a tambor rotativo ou plasma pirólise?

1.2 Justificativa

Diante do exposto anteriormente, fica evidente que a quantidade de resíduos sólidos gerados e seus meios de disposição são agravantes para o bem-estar da sociedade (RAMOS *et al*, 2014). Com isso, alternativas como tratamentos para os RSU estão, de fato, cada vez mais em alta, principalmente pela possibilidade de se gerar energia a partir do produto final (SZIGETHY e ANTENOR, 2020).

Desta forma, é possível encontrar estudos que caracterizam maneiras eficientes de realizar esse processo, como através da produção de combustível derivado de resíduos, mencionado por Aluri *apud* Carvalho (2019). A exemplo disso, pode citar-se o projeto da usina de Boa Esperança, Minas Gerais, a qual tratamento empregado é capaz de converter aproximadamente 55 toneladas/dia de resíduos em 30 toneladas/dia em combustível, o que

será utilizado para posterior produção de energia em uma usina de gaseificação, o que gera circulação à economia da cidade (CARVALHO *et al*, 2019).

Ademais, com a redução do volume de RSU tem-se outros benefícios além do âmbito econômico citado anteriormente. Pode-se destacar a minimização da degradação ambiental e da higidez pública, uma vez que a acomodação irregular acarreta em contaminação de solos, cursos d`águas e lençóis freáticos, além de potencializar a proliferação de doenças como leptospirose, dengue, leishmaniose, esquistossomose, entre outras (SZIGETHY e ANTENOR, 2020).

Estudos do IBGE (2008), apontam também que 30,7% das inundações e alagamentos em municípios brasileiros ocorreram devido ao descarte inadequado de resíduos sólidos urbanos. Logo, com os dados apresentados, fica evidente as vantagens de processar adequadamente os resíduos dos centros urbanos.

Por conseguinte, o prosseguimento com os estudos acerca do tema é necessário, bem como incentivo e implementação dos processos já citados. Assim, será possível mitigar os malefícios causados pela má gestão dos RSU, como também gerar economia para os centros urbanos, o que dispensa e reduz a necessidade de disposição final.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Comparar os processos de pirólise lenta a tambor rotativo e plasma pirólise em termos técnicos e ambientais, aplicados a resíduos sólidos urbanos.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a definição e disposição dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, os tratamentos existentes, os processos de termodegradação de resíduos sólidos por pirólise lenta e por plasma pirólise;
- Estabelecer uma metodologia para consulta bibliográfica;
- Comparar os dois processos;
- Elucidar o tratamento mais vantajoso.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está desenvolvido ao longo de cinco capítulos, sendo o primeiro correspondente à formulação do problema, definição das justificativas e seus objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica dos processos mais comuns de tratamento dos resíduos sólidos urbanos e daqueles empregados atualmente no Brasil.

O terceiro capítulo irá abordar a metodologia científica e a metodologia a ser estudada neste trabalho.

No quarto capítulo é apresentado os resultados e discussões das pesquisas e análises de ambos os processos.

Por último, o quinto capítulo expõe as conclusões do estudo, finalizando as comparações e discorrendo as principais considerações de acordo com os dados apresentados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

Conforme o relatório *What a Waste 2.0* do *World Bank* (2018), por ano são gerados aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, trazendo uma previsão de 3,40 bilhões de toneladas para o ano de 2050. Visando amenizar a situação, ao redor do mundo foram sendo desenvolvidas tecnologias de tratamento desses resíduos, cada uma com suas respectivas características (SZIGETHY e ANTENOR, 2020). Os métodos mais comuns são: Reciclagem, digestão anaeróbia, compostagem e incineração (SZIGETHY e ANTENOR, 2020). Entretanto, outras opções foram surgindo e ganhando notoriedade devido a sua eficiência, como o caso da pirólise e suas derivações (SZIGETHY e ANTENOR, 2020).

Resíduos sólidos urbanos tem uma caracterização complexa, por isso Lima (2004, p. 11) determina como:

> Não é uma tarefa fácil definir lixo urbano, pois sua origem e formação estão ligadas a inúmeros fatores, tais como: variações sazonais, condições climáticas, hábitos e costumes, variações na economia etc. Assim, a identificação destes fatores é uma tarefa muito complexa e somente um intenso estudo, ao longo de muitos anos, poderia revelar informações mais precisas no que se refere à origem e formação do lixo no meio urbano. Entretanto, é comum definir como lixo todo e qualquer resíduo que resulte das atividades diárias do homem na sociedade.

De acordo com a norma ABNT/NBR nº. 10.004 (2004), resíduos sólidos são classificados como perigosos e não perigosos, em que os não perigosos são julgados também como inerte e não inertes. Para isso, é necessária uma análise do processo originário, composição e analogia com a listagem de resíduos a qual se conhece o impacto ao meio ambiente e a saúde da população (GOMES, 2018).

Segundo a ABRELPE (2021), a geração de RSU no Brasil aumentou cerca de 4% (bem acima do crescimento anual médio de 1% visto nos últimos cinco anos), com uma média de 1,07 kg/hab/dia. Esse aumento pode ser justificado devido a pandemia da Covid-19, uma vez que o isolamento social fez com que boa parte dos brasileiros tivessem de realizar suas atividades dentro de suas residências, elevando, assim, o consumo e descarte de resíduos (ABRELPE, 2021).

A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) (2012) evidencia que os locais de disposição final dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais são,

primordialmente, aterros sanitários, aterros controlados e lixões. A Tabela 1 apresenta os conceitos de cada um com auxílio da norma ABNT/NBR nº. 8419 (1992).

Tabela 1: Classificação das categorias de disposição de RSU

Categoria	Definição
Aterro Controlado	Disposição final temporária dos RSU, utilizada até a implementação de um sistema ideal.
Aterro Sanitário	De acordo com a norma ABNT/ NBR nº. 8419 (1992), é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, se valendo de estudos e engenharia em que não há danos à saúde pública e à segurança, o que acarreta em diminuição dos impactos ambientais, pois, os resíduos são reduzidos ao menor volume possível na menor área permissível, sendo, o solo, nivelado e impermeabilizado para não contaminar o lençol freático, além de contar, também, com recobrimento diário (ou, de acordo com a necessidade), com uma camada de terra.
Lixão	Forma de disposição considerada incorreta, em que os RSU são colocados a céu aberto sem nenhum critério, o que acarreta a fragilização da saúde, segurança e o meio ambiente.

Fonte: Adaptado de Ramos *et al* (2014)

Observa-se que, a Tabela 1 diferencia cada alternativa de disposição dos RSU, destacando o porquê de o aterro sanitário ser o destino correto frente ao lixão.

Já na Figura 2, ilustra-se um modelo tridimensional simplificado de um aterro sanitário.

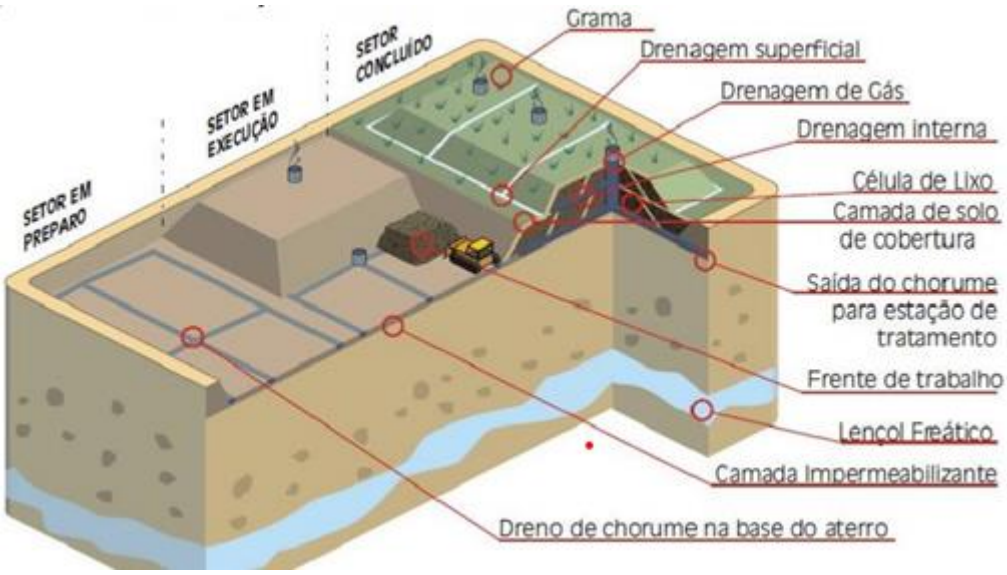

Figura 2: Corte esquemático de um aterro sanitário
Fonte: Portal resíduos sólidos (2022)

Nota-se que, a Figura 2 demonstra os setores e as principais divisões de um aterro sanitário.

O panorama da ABRELPE (2021), sinaliza que, em 2020 aproximadamente 46 milhões de toneladas de RSU tiveram como destino os aterros sanitários, enquanto que 30 milhões não foram dispostos em locais adequados, ou seja, foram para lixões e aterros controlados. A Figura 3 mostra a distribuição de resíduos gerados por região do Brasil.

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.773.927	35,6%	3.209.013	64,4%
Nordeste	6.016.948	36,3%	10.558.666	63,7%
Centro-Oeste	2.456.849	42,5%	3.323.972	57,5%
Sudeste	29.542.830	73,4%	10.706.257	26,6%
Sul	6.011.894	70,8%	2.479.482	29,2%
Brasil	**45.802.448**	**60,2%**	**30.277.390**	**39,8%**

Figura 3: Disposição final de RSU no Brasil e regiões
Fonte: ABRELPE (2021)

É possível visualizar que, na Figura 3, evidencia-se como a região influencia na quantidade de resíduos sólidos gerados, já que somente o Sudeste foi responsável por cerca de 52% dos resíduos em todo país.

Como mencionado por Ramos *et al* (2014), o Brasil possui várias normas e legislações que visam preservar o meio ambiente e solucionar os problemas relacionados à disposição dos resíduos sólidos urbanos. As principais são as resoluções de número 006/88, 005/93, 275/01 da CONAMA, as NR 1.057, 1.025, 8.889, 844 e 842, que gerenciam a limpeza urbana, manejo e processamento dos lixos no Brasil. Vale destacar, também, a Lei Federal de Saneamento Básico, a Política Nacional sobre a Mudança no Clima, a Lei Federal dos Consórcios Públicos e, principalmente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que representa um marco na gestão de RSU no país (RAMOS *et al*, 2014). Todas essas políticas foram adotadas visando incentivar o desenvolvimento de tecnologias consideradas limpas, as quais possam obter retorno energético e financeiro (RAMOS *et al*, 2014).

2.2 Alternativas para o Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos

O crescente número de resíduos sólidos urbanos gerados diariamente, juntamente com a conscientização global acerca da preservação ambiental, fez aumentar o número de

pesquisas e soluções tecnológicas para o tratamento de RSU (BERTO, 2020). Ainda segundo Andreoli *apud* Berto (2020), por conta do esgotamento das possibilidades de se reutilizar os resíduos, surgem, então, métodos e técnicas de reprocessamento química e física, a fim de obter-se uma recuperação energética. Algumas dessas alternativas são:

2.2.1 Tratamentos Mecânicos

Definido como tratamentos manuais com objetivo de separar a fração reciclável da orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RAMOS *et al*, 2014). São caracterizados por demandarem mão-de-obra devido dificuldade de automatização, resultando em um baixo retorno financeiro (RAMOS *et al*, 2014). São exemplos de tratamento mecânicos: Triagem, coleta seletiva, linha de separação, entre outros (RAMOS *et al*, 2014).

- **Triagem**

A triagem tem como finalidade, recuperar materiais através da reciclagem para serem reutilizados (RAMOS *et al*, 2014). Para isso, faz-se necessário a coleta, que pode ocorrer através de processos físicos, catadores e coleta seletiva (RAMOS *et al*, 2014).

Ramos *et al* (2014), destaca que, o método tem como vantagens a geração de emprego (por meio da legalização dos catadores), e, a principal - caracteriza-se pela minimização do impacto no meio ambiente - já que muitos desses materiais levaria muito tempo para se decompor. Como desvantagem, pode ser mencionado o retorno financeiro, uma vez que os valores obtidos com a comercialização desses produtos costumam ser baixos e menores do que o gasto com a mão de obra (RAMOS *et al*, 2014). Na Figura 4, pode-se observar um exemplo de linha de triagem.

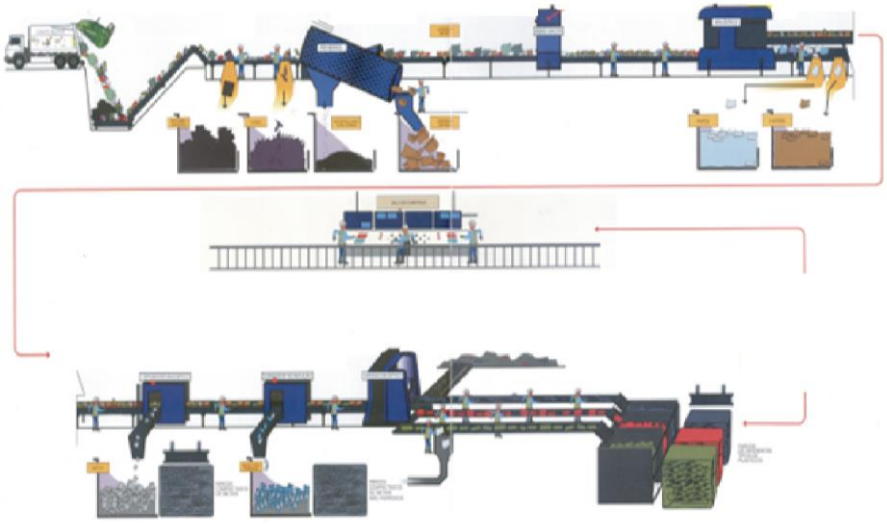

Figura 4: Linha de separação de recicláveis
Fonte: Adaptado de Prefeitura de São Paulo (SP) (2014)

Na Figura 4, é ilustrado como a triagem é um processo mais simples, porém mecanizado e dependente de mão-de-obra.

De acordo com Szigethy e Antenor (2020), podem ser citadas como opções de triagem:

- Sistema de coleta subterrânea – a qual consiste em um armazenamento de resíduos semi-subterrâneo e subterrâneo para materiais orgânicos, recicláveis e óleos, sendo de baixa manutenção e apropriado para regiões com temperaturas locais consideravelmente altas;
- Sistema de informação geográfica (SIG) – possui como características, etapas automatizadas e rastreabilidade, além de dados como número de residentes e rotas mais favoráveis. Portanto, auxilia no gerenciamento do ciclo dos RSU, desde a coleta até o tratamento;
- Caixas multi-compartimentos – caracterizada por caixas com compartimentos para resíduos variados (orgânicos e recicláveis), segrega os RSU;
- Sistemas de triagem automatizados – para ser possível classificar e separar os resíduos por sua composição de maneira automática, é feito o uso de câmeras, sensores e até mesmo espectroscopia de infravermelho.

2.2.2 Tratamentos Biológicos

Como dito por Engebio *apud* Coser (2021), consiste em tratamentos no qual ocorre o processo natural de decomposição dos resíduos orgânicos (excluindo a fração reciclável dos RSU). O mais comumente utilizados é a digestão anaeróbia, que tem como produto o biogás e a compostagem, a qual produz adubo orgânico (COSER, 2021).

- **Digestão Anaeróbia**

O processo de digestão anaeróbia ocorre em uma câmara fechada sem a presença de ar (biodigestor) e é caracterizado pela fermentação da biomassa através da ação de bactérias metanogênicas (LOPES, 2015). Ainda segundo Lopes (2015), tem como produto o biogás e um material utilizado como fertilizante, e seus componentes são: Uma caixa de entrada (por onde entra os resíduos orgânicos), a câmara (onde ocorre a digestão da biomassa), gasômetro e a caixa de saída, conforme ilustrado pela Figura 5.

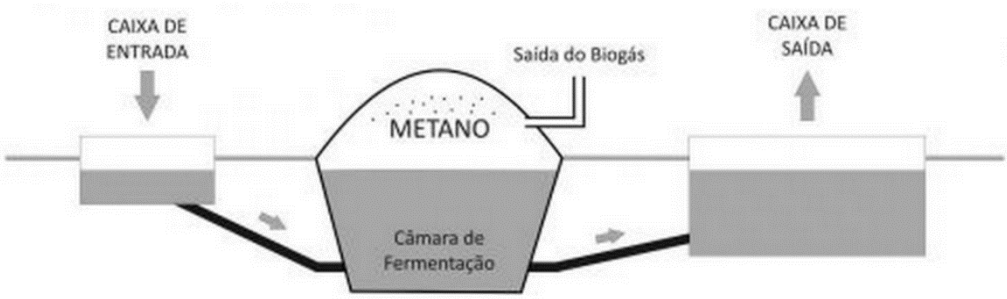

Figura 5: Esquema básico de um biodigestor
Fonte: GATE-GTZ (1998)

Na Figura 5 é possível visualizar, de maneira simples, a função de cada componente e o sentido em que ocorre todo o processo.

O seu produto, o biogás, pode ser utilizado para aquecimento, combustível veicular e geração de energia elétrica (CASSINI *apud* LOPES, 2015). Para seu uso nas duas primeiras opções, deve ser previamente tratando para retirada de substâncias não combustíveis, minimizando a corrosão de equipamentos, aumentando a eficiência e atendendo ao padrão da Agência Nacional de Petróleo (CASSINI *apud* LOPES, 2015). Para a última opção de reaproveitamento, o biogás deve ter uma concentração baixa de metano (para viabilizar o projeto, como o custo do processo de “lavagem”), e, consequentemente, as tecnologias empregadas na conversão, são turbinas e microturbinas a gás, além de motores de combustão interna (BNDES *apud* LOPES, 2015).

A digestão anaeróbia ocorre em etapas, na sequência são: Pré-tratamento, fermentação dos resíduos, recuperação do biogás e tratamento dos resíduos digeridos (BNDES *apud* LOPES, 2015). Devido à necessidade do pré-tratamento do RSU para a separação dos materiais recicláveis, contaminantes e os não combustíveis da matéria orgânica - a ser processada no digestor (homogeneização) - as plantas acabam por se tornar complexas, mesmo o processo em geral sendo considerado simples (EPRI *apud* LOPES, 2015).

- **Compostagem**

Na compostagem tem-se como objetivo gerar um produto húmico (adubo), através da degradação da matéria orgânica por meio da ação de microrganismos na presença de oxigênio (RAMOS *et al*, 2014). Contudo, tal técnica é mais válida para pequenos centros, devido ao custo de automatizar e a dificuldade de separar em grandes quantidades a parte orgânica dos recicláveis nos RSU, o que exige muita mão de obra quando feita de maneira manual (LIBÂNEO *apud* RAMOS, 2002). A Figura 6 traz um esquema de uma unidade de triagem e compostagem localizada no estado do Rio Grande do Sul.

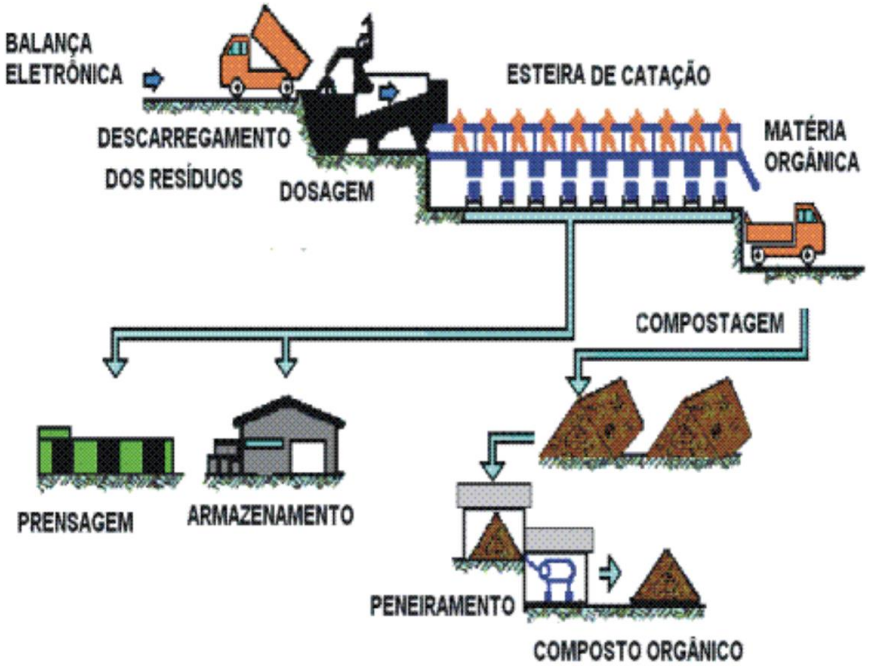

Figura 6: Esquema da unidade de triagem e compostagem de RSU
Fonte: Prefeitura de Porto Alegre – RS (2000)

Vale destacar que, como ilustrado pela Figura 6, a compostagem necessita de ser acoplada juntamente com um sistema de separação de resíduos (recicláveis dos orgânicos), e nesse caso foi optado pela triagem manual.

Szigethy e Antenor (2020) citam outros exemplos de tratamento biológico, como: Autoclavagem – para conseguir atingir a segregação dos materiais por composição, como fibra orgânica, vidro, metal e plástico, é esterilizado os RSU com o uso de vapor à temperaturas entre 140 e 160°C; *Fluffing*, sendo que um vapor de alta temperatura quebra as ligações moleculares e destrói patógenos, separando a parte orgânica das demais e resultando na produção de *fluff* (polpa orgânica), para uso em solos, ao mesmo tempo que um triturador age sobre os materiais não orgânicos (papel, metal e vidro); Vermicompostagem – produção de biofertilizante por meio de processamento com minhocas de resíduos de origem farmacêutica, alimentícia, animal e de esgotos.

2.2.3 Tratamentos Térmicos

Alguns dos processos térmicos encontrados atualmente são o de incineração, liquefação direta, indireta, gaseificação, plasma e pirólise, onde que todos se caracterizam por se valerem de altas temperaturas e/ou pressões (RAMOS *et al*, 2014).

- **Incineração**

Este tratamento é determinado como a tecnologia onde ocorre a conversão de resíduos combustíveis em não combustíveis ou cinzas. Tal processo resulta na redução da massa e volume do RSU, além da eliminação de microrganismos patogênicos, uma vez que tudo acontece em altas temperaturas, variando de 600 a até 1100°C (COSTA *apud* RAMOS, 2014).

Esse método garante uma produção energética e uma eficiência energética acima de 80%, dependendo do resíduo a ser queimado (DEFRA *apud* RAMOS, 2014). Infelizmente, apresenta como desvantagens a produção de toxinas, metais pesados e dióxido de carbono (COSTA *apud* RAMOS, 2014). Portanto, para amenizar a problemática, deve ser feito o uso de filtros e sistemas de tratamento dispendiosos (COSTA *apud* RAMOS, 2014). A Figura 7 ilustra, resumidamente, um diagrama de processo de uma incineradora.

Figura 7: Diagrama processual de uma incineradora
Fonte: A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos (2022)

Por meio da Figura 7 pode-se notar que o processo de incineração produz vários produtos e subprodutos, onde cada um pode ser aproveitado para maximizar a eficiência do sistema.

É válido mencionar que, o processo de fusão - em que o princípio de funcionamento é bem próximo da incineração - pode derreter os resíduos com o uso de eletricidade, o que faz com que ocorra alteração na temperatura de processo, que, neste caso, fica próximo de 1400°C (SZIGETHY e ANTENOR, 2020). O resíduo sólido resultante tem reutilização na construção civil, recuperação de solos e indústrias (SZIGETHY e ANTENOR, 2020).

- **Liquefação direta e indireta**

Na liquefação direta o processo acontece em uma etapa, com a temperatura entre 350 a 500°C, e pressão elevada (COSTA *apud* RAMOS, 2014). Seu propósito é de converter os resíduos em produtos líquidos com alto valor agregado, os quais serão aproveitados como matéria-prima em indústrias ou como combustível (COSTA *apud* RAMOS, 2014). Enquanto que, na indireta, tem como objetivo a obtenção de líquidos por meio do gás de síntese (COSTA *apud* RAMOS, 2014).

- **Gaseificação**

Tem, como resultante, alguns subprodutos, sendo eles: o alcatrão, resíduo sólido carbonoso e cinzas, e, como produto, o gás de síntese, o qual possui uma mistura gasosa composta por monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, nitrogênio, vapor de água, hidrogênio e hidrocarbonetos mais pesados (em pequena quantidade) (LOPES *apud*

SOBRINHO, 2020). Esse gás é utilizado em turbinas, motores de combustão interna, células a combustível e como combustíveis para caldeiras, além de ser resultado de um processo de conversão termoquímica de resíduos que ocorre entre 750 e 900°C, que pode ser dividido em três etapas, as quais são de secagem, pirólise e por último a de gaseificação (PARADELA *apud* RAMOS, 2014).

A Figura 8 apresenta esquematicamente os componentes necessários para o funcionamento de uma usina de recuperação energética por meio desse tratamento.

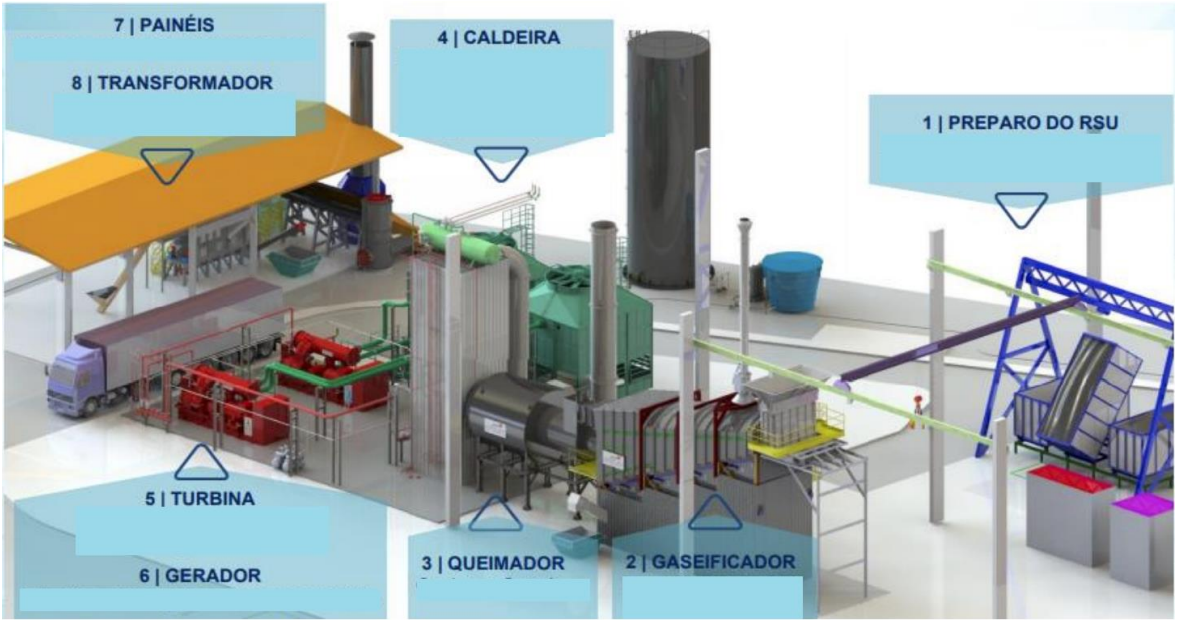

Figura 8: Componentes de um sistema de gaseificação
Fonte: Adaptado de Fernandes (2020)

Importante notar que, a Figura 8 demonstra, além dos componentes, o passo a passo do processo de gaseificação, desde do preparo do RSU até a geração de energia.

- **Pirólise**

Processo termoquímico onde ocorre a degradação térmica de materiais orgânicos em meio anaeróbio (RAMOS *et al*, 2014). Se divide em duas classificações, pirólise lenta e rápida, a primeira se dá por uma reação lenta a baixas temperaturas, enquanto que a segunda é utilizada visando maximizar os produtos, sejam eles gasosos ou líquidos (RAMOS *et al*, 2014). Os produtos resultantes podem ser utilizados em indústrias ou como combustíveis, quando no estado líquido (COSTA *apud* RAMOS, 2014).

- **Plasma**

Transformação dos resíduos sólidos em gás de síntese através de uma grande quantidade de energia – provinda das tochas de arco a plasma – (decomposição química por calor sem a presença de oxigênio) (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Os gases formados são filtrados e direcionados a uma turbina a gás, conectada a um gerador elétrico, o que gera eletricidade a partir da conversão de energia térmica em mecânica (ENGEBIO *apud* COSER, 2021).

2.3 Pirólise

O tratamento de RSU conhecido como pirólise - de acordo com Coser (2021) - é definido como a degradação térmica de materiais orgânicos na ausência parcial ou total de um agente oxidante. Ainda, segundo o autor, para início do processo, se faz necessário a separação mecânica (pré-tratamento), dos resíduos, retirando os metais, vidros e materiais inertes. Após, ocorre, através da aplicação de uma fonte externa de calor na câmara, o início da decomposição térmica dos materiais orgânicos a uma temperatura de aproximadamente 300°C, aumentando para 800°C com uma atmosfera não reativa (MOYA *apud* COSER, 2021). É possível diferenciar os tipos de pirólise de acordo com o tempo e a temperatura de processo, conforme a Tabela 2 (PARADELA *apud* RAMOS, 2014).

Tabela 2: Classificação de pirólises por tempo e temperatura

Classificação	**Definição**
Gaseificação Pirolítica	Altas temperaturas, elevado tempo de residência, objetivo de maximizar a produção de gases (gás de síntese).
Pirólise instantânea (pirólise *flash*)	Altas velocidades de aquecimento (> 1.000°C/s), baixo tempo de residência (< 1s), objetivo de maximizar a transferência de calor.
Pirólise rápida	Temperaturas moderadas (+- 600°C), altas velocidades de aquecimento (10 a 200°C/s), objetivo de maximizar a fração líquida dos produtos.
Pirólise lenta	Baixas temperaturas (< 500°C), baixas velocidades de aquecimento (< 2°C/s), maximização dos resíduos sólidos.

Fonte: Adaptado de Ramos (2014)

É apresentado pela Tabela 2 as diferenças entre os tipos de pirólise e, como a variação de temperatura e tempo de processo influenciam em como o produto final será entregue. Para este trabalho será analisado a pirólise lenta e *flash* (plasma), devido a suas características e resultados.

2.3.1 Pirólise Lenta a Tambor Rotativo

O método pirólise lenta a tambor rotativo é considerado como uma evolução da pirólise lenta, devido à possibilidade de se tratar uma variedade de matrizes orgânicas, incluindo as de baixa qualidade, como é o caso dos RSU, além da obtenção de gás de síntese limpo que permite o seu uso em turbinas e geradores a gás (RAMOS *et al*, 2014). Todas essas vantagens permitem desenvolver sistemas modulares e compactos, viabilizando os investimentos para a construção de plantas minigeradoras (RAMOS *et al*, 2014).

As etapas do processo estão representadas na Figura 9.

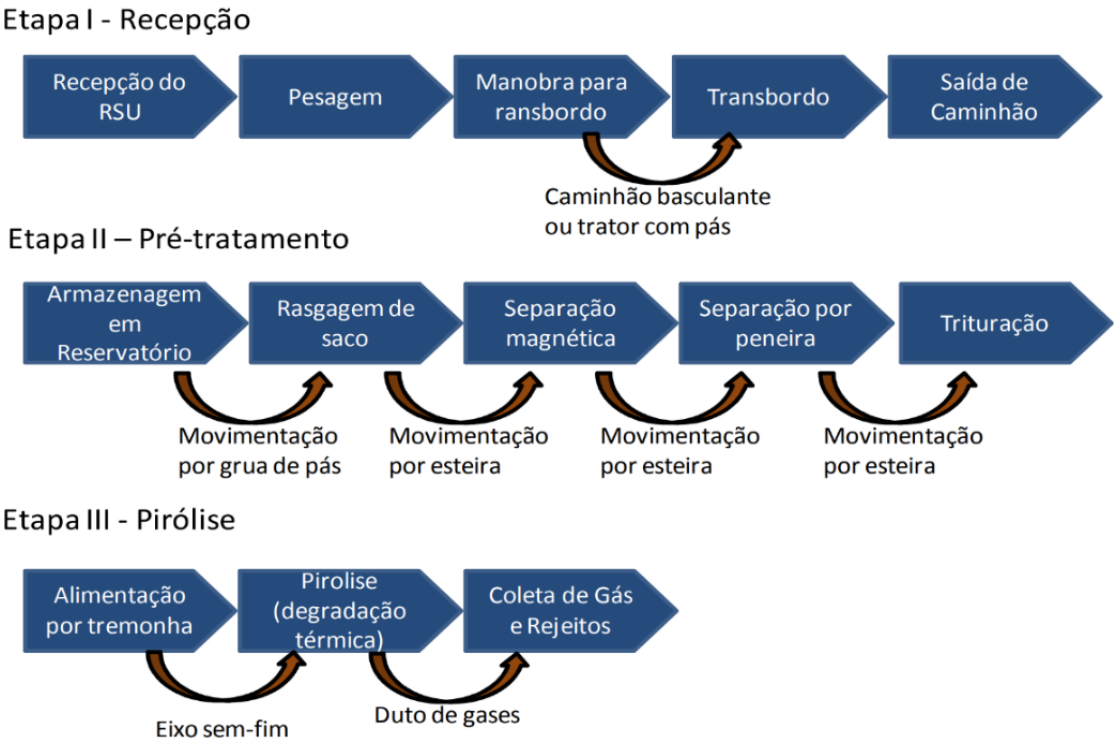

Figura 9: Etapas do processo de PLTR
Fonte: CARDOSO (2012)

Como ilustrado na Figura 9, o RSU é pesado, armazenado em silo, transportado por esteira (perfurada para drenagem dos líquidos dos resíduos), até uma plataforma para coleta manual de resíduos recicláveis como metais vidros, plásticos, metais ferrosos e não ferrosos, entre outros [exigido pela Lei 12.305/10 – PNRS – (2010)], afim de seguir o fluxo somente à matéria orgânica (CARVALHO *et al*, 2019). Nesse momento, fica a critério do projeto, já que pode ser incluído britadores (afim de diminuir as partículas) antes ou/e depois do o separador magnético, após são levados para um separador por ar ou peneira, britadores e, podendo novamente, incluir outras etapas antes da alimentação por tremonha, como outros britadores

(para diminuir ainda mais as partículas e padronizá-las), além de separador de metais não ferrosos e secador (diminuir a umidade e homogeneizar os resíduos) (CARVALHO *et al*, 2019). Agora, podem ser armazenados em estoque ou enviados para tremonha e finalmente para o processo de pirólise, onde os RSU é convertido em gás de síntese e em subprodutos (CARVALHO *et al*, 2019).

A Figura 10 traz as etapas do processo após a coleta dos produtos e subprodutos.

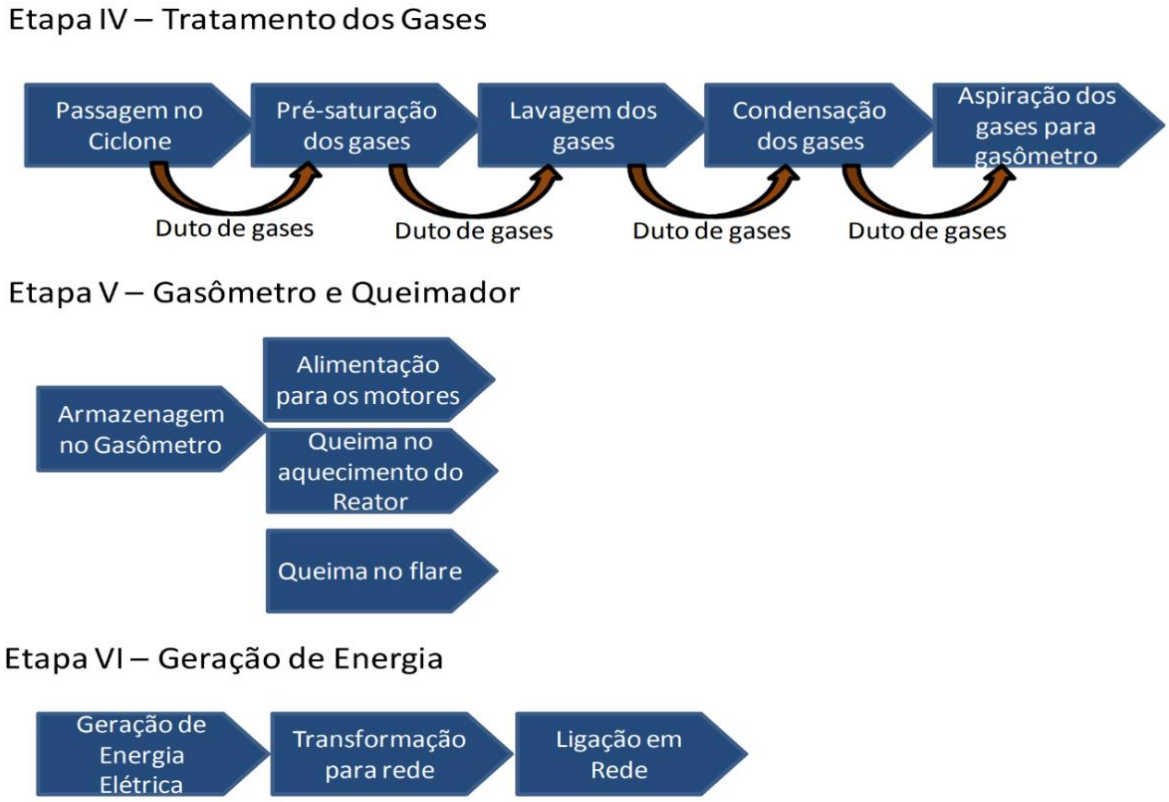

Figura 10: Etapas do processo
Fonte: CARDOSO (2012)

A Figura 10 ilustra o tratamento do gás de síntese gerado no processo e sua utilização para geração de energia, sendo interessante notar que o mesmo também serve como combustível para o processo.

Agora, voltando no processo de pirólise, é importante mencionar que há um estágio de aquecimento para a estabilidade operacional, para que o reator opere em condições de regime permanente (CARVALHO *et al*, 2019). A termodegradação ocorre a aproximadamente 800°C, com isso, o reator é alimentado gradativamente e a pressão interna é positiva em condição estacionária (CARVALHO *et al*, 2019). É adicionado calcário ($CaCO_3$), afim de

minimizar a formação de gases poluentes durante o processo, devido a sua reação com o dióxido de enxofre (SO_2), resultando na produção de sulfito de cálcio ($CaSO_2$) (CARVALHO *et al*, 2019). Outro ponto positivo dessa adição, é a remoção do alcatrão durante a gaseificação e a redução da formação de ácido sulfídrico (H_2S), ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico (HF), no decorrer da combustão do gás de síntese (SIKARWAR *apud* CARVALHO, 2019).

Durante o processo de degradação, além do produto principal (*syngas*), é gerado também subprodutos como o biochar e materiais inertes (vidros, metais e rochas) (CARDOSO e BARROS, 2012). O gás de síntese é, então, direcionado para um ciclone axial localizado na parte interna superior do reator, esse equipamento maximiza a produção do gás removendo os particulados (CARVALHO *et al*, 2019). Do ciclone, passa por tubos externos para resfriamento do gás e pré-aquecimento do ar (melhorando a eficiência do processo), e, após isso, direcionado para o sistema de lavagem (CARVALHO *et al*, 2019). Assim, o gás é condensado e aspirado para o gasômetro, sendo que, posteriormente é, uma parte, utilizado como alimentação para os motores, queima no aquecimento do reator e queima no *flare*, enquanto que o restante é utilizado para geração de energia elétrica (CARVALHO *et al*, 2019).

Os subprodutos gerados são inertes, como vidros, metais e rochas - que não foram eliminados antes do processo - além do biochar, caracterizados como resíduos não convertidos (CARDOSO e BARROS, 2012). Definido como produto secundário da pirólise, o biochar possui especificações similares às do carvão vegetal, trazendo vantagens quando aplicado ao solo (CARDOSO e BARROS, 2012). São elas: Minimizar o lixiviamento de fertilizantes, aumentar a retenção de água no solo, sequestrar carbono da atmosfera, aumentar a produção de alimentos, incorporar matéria orgânica, promover o crescimento de microrganismos essenciais para a absorção de nutrientes, entre outros (CARDOSO e BARROS, 2012).

Na Figura 11, tem-se um esquema de funcionamento e, na Tabela 3, as emissões de uma usina de pirólise lenta a tambor rotativo.

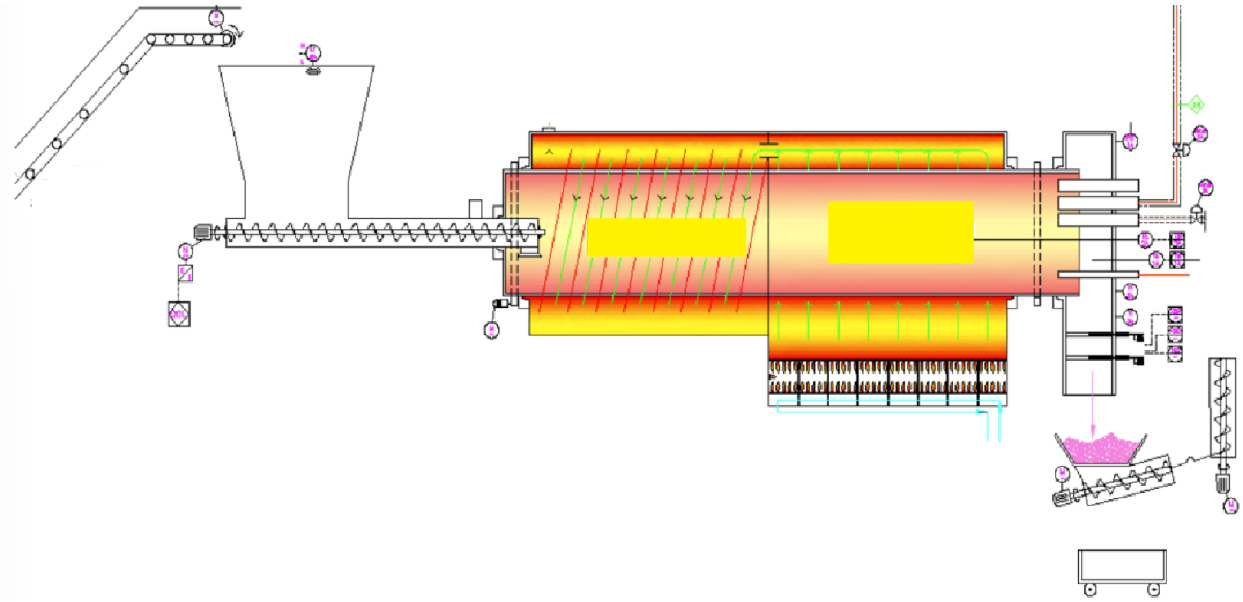

Figura 11: Esquema de uma usina de pirólise lenta a tambor rotativo
Fonte: Adaptado de CARDOSO (2012)

Tabela 3: Emissão do sistema de aquecimento do reator (em mg/Nm^3)

Sistema de Aquecimento do Reator		
mg/Nm^3	Emissões na chaminé	Limites Normativos CONAMA 316/2002
Particulado	0,89	70
HCl	0,000	80
HF	0,000	5
SO_2	2,5	280
NO_x	370	560
CO	21,9	123
Metais Pesados	0,000	0,28
Hidrocarbonetos totais	<10	/
Dioxinas e Furanos (ng/Nm^3)	0,000	0, 5

Fonte: CARDOSO (2012)

A Figura 11 demonstra esquematicamente algum dos equipamentos necessários para o funcionamento de uma usina PLTR (pirólise lenta a tambor rotativo), em concordância com os mencionados na Figura 9. Importante ressaltar, também, a baixa emissão de substâncias e poluentes pelo sistema, conforme a Tabela 3.

2.3.2 Plasma Pirólise

A tecnologia de arco de plasma, conhecida também como plasma pirólise – por ser um tratamento relativamente novo – é encontrada somente em duas usinas, as quais trabalham

com tal método, ambas no Japão (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Como já dito, resumidamente, diferencia-se dos demais por apresentar temperaturas muito elevadas, para assim causar a dissociação e ionização das partículas de RSU em um nível atômico (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Tais processo ocorrem por meio de um faiscamento devido ao potencial elétrico (ânodo e cátodo), o que gera um arco elétrico responsável por conduzir a energia elétrica e produzir, a partir disso, calor suficiente para converter as partículas em plasma (ENGEBIO *apud* COSER, 2021).

Portanto, durante o processo ocorre a destruição dos resíduos, vinculando altas temperaturas geradas pelo plasma com a pirólise de resíduos, daí o nome de plasma pirólise (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Com isso, tem-se, primeiro, tem-se a gaseificação dos RSU, a partir de uma inserção alta de energia (provinda das tochas a arco de plasma), já que em termos químicos, quando o gás atinge temperaturas próximas a 2.000°C as moléculas iniciam a dissociação em estado atômico, já a partir de 3.000°C os átomos são ionizados (perda de uma parcela dos elétrons) (ENGEBIO *apud* COSER, 2021).

Chamado de o quarto estado da matéria, o plasma é uma substância gasosa capaz de conduzir muito bem eletricidade e, por conta disso, apresenta alta viscosidade (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Dependendo das condições de geração, as temperaturas nesse estado variam de 5.000 a 50.000°C, e para atingir esses valores, as usinas podem se valer tanto de corrente contínua quanto de corrente alternada (sendo a contínua, a mais utilizada) (ENGEBIO *apud* COSER, 2021).

A tocha de plasma é incumbida da transformação da energia elétrica em calor transportado por um gás, com eficiência de 85% a 90% (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). É aqui em que ocorre a geração e controle do plasma, possuindo uma arquitetura parecida com a de queimadores utilizados em fornos e, que pode ser classificada como tocha de arco não transferido ou de arco transferido (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). O primeiro caracteriza-se quando o arco é produzido no interior do dispositivo de geração, portando, os eletrodos é o local de onde deriva-se o gás aquecido (possibilidade de trabalhar com qualquer corrente) (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Já o segundo, vale-se de um eletrodo transmissor com o receptor localizado fora da tocha, podendo ser tal material sob aquecimento ligado ao circuito por meio de um eletrodo, ou, ser outro eletrodo transmissor (opera somente com corrente contínua) (ENGEBIO *apud* COSER, 2021).

Todo produto resultante do processo é exposto a altas temperaturas, são eles: os gases da decomposição e a escória vitrificada (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Tais gases são

provenientes da decomposição dos gases da queima dos resíduos no reator de decomposição térmica a plasma, e são compostos por hidrogênio e monóxido de carbono (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). A escória, neste caso, é oriunda da queima do RSU – onde que ocorre a vitrificação do material inorgânico no fundo da fornalha – a qual se assemelhando a um mineral de alta dureza (ENGEBIO *apud* COSER, 2021).

Por fim, esse método tem como vantagens uma rápida e completa pirólise dos resíduos orgânicos, fundição e vitrificação de materiais inorgânico e alta taxa de redução de volume (chegando a mais de 99%) (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Todavia, se trata de uma tecnologia complexa, exigindo componentes altamente resistentes (devido a altas temperaturas), além de não dispensar o uso de um sistema de lavagem de gases (semelhante ao componente dos incineradores), o que eleva o custo de investimento (ENGEBIO *apud* COSER, 2021). Inicialmente o volume gerado de gás é menor que o produzido em um processo de combustão convencional, porém, a partir do momento que ocorre a combustão dos gases gerado, o tratamento de plasma pirólise se equipara com outros métodos de incineração (ENGEBIO *apud* COSER, 2021).

A Figura 12 traz uma representação de uma usina a arco de plasma.

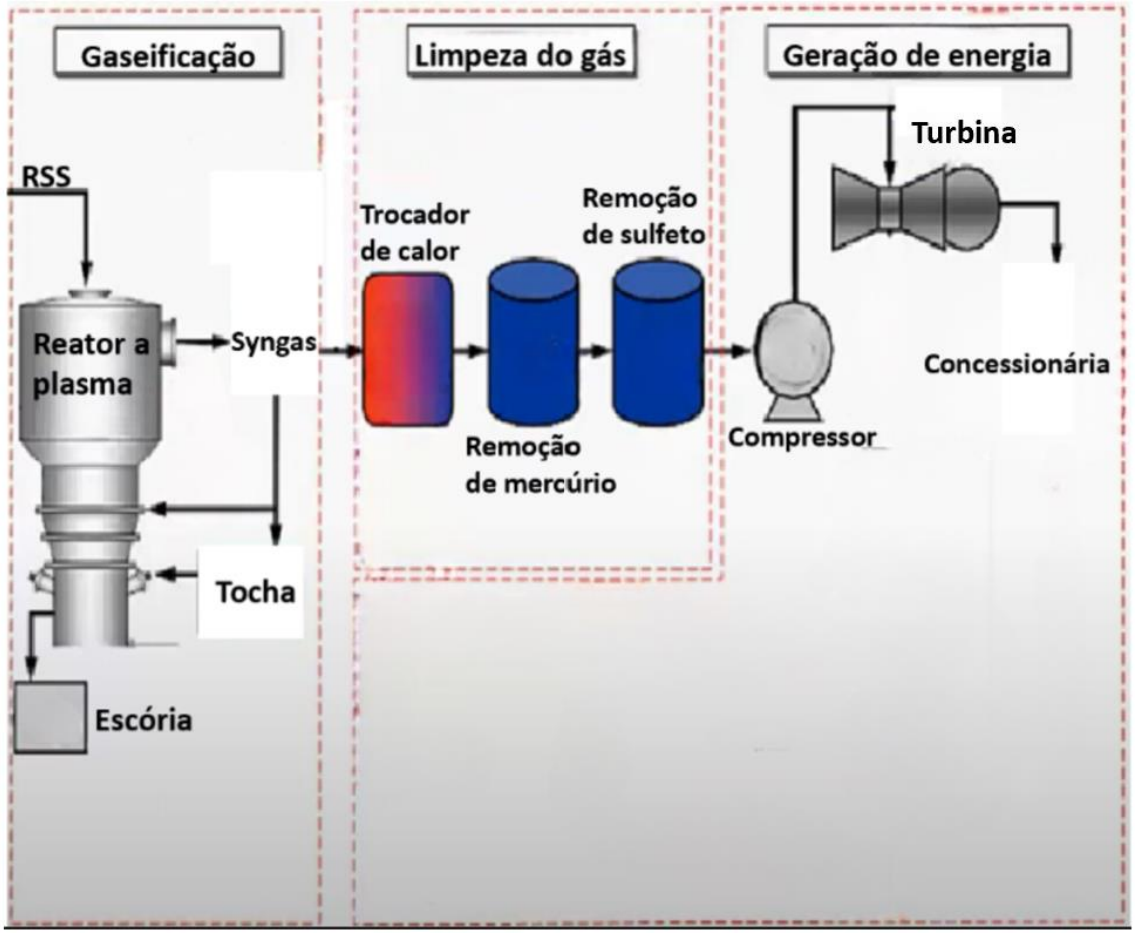

Figura 12: Componentes de uma usina a arco de plasma
Fonte: NRG (2010)

Observa-se na Figura 12 a similaridade do processo de plasma pirólise com o PLTR, diferenciando apenas no início (onde nesse caso não há a preparação dos resíduos sólidos) e também no equipamento onde ocorre a termodegradação.

2.4 Conclusão

É possível afirmar, portanto, que existem várias alternativas para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos. Será analisado os métodos de pirólise lenta a tambor rotativo e plasma pirólise para comparação.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de Pesquisa

O conceito de pesquisa, de acordo com Gil (1991), é um processo de investigação/ indagação que tem como objetivo promover respostas para os questionamentos levantados. Também é mencionado, pelo autor, que a pesquisa se faz necessária no momento que as informações disponíveis estão desorganizadas, ou, então, quando elas não são suficientes para a resolução dos problemas.

Gil (1991), classifica a pesquisa quanto aos objetivos da seguinte maneira: Exploratória, descritiva e explicativa. Ainda - de acordo com Gil - a primeira apresenta perguntas que podem se tornar pesquisas em outro momento, enquanto que a segunda visa observar, avaliar e discorrer as características dos eventos em questão por meio de dados. Por último, a terceira tem como método levantar a contribuição e aprofundar os conceitos dos elementos que podem influenciar os eventos em questão (GIL, 1991). Diante da classificação apresentada, este trabalho apresenta uma pesquisa descritiva.

A pesquisa também pode ser classificada de acordo com a forma de abordagem, podendo ser quantitativa ou qualitativa (MARCONI e LAKATOS, 2021). Segundo Marconi e Lakatos (2021), a primeira tem-se como objetivo uma tomada racional aos fenômenos expostos por meio de uma análise estatística/matemática, enquanto que a segunda traz uma abordagem que explora os aspectos subjetivos de fenômenos sociais e de comportamentos, não se valendo de fundamentação estatística. Este presente trabalho trata-se de uma pesquisa qualitativa, dada as suas características.

Para Vergara (2016), pesquisa também é classificada de acordo com os procedimentos técnicos, assim sendo:

- Bibliográfica – pesquisa baseada em material já publicado e acessível;
- Documental – é feito a coleta de dados exclusivamente em documentos de origem pública ou privada;
- Experimental – trata-se de uma pesquisa onde as variáveis são controladas para observação da resultante pelo pesquisador (empírica);
- Estudo de caso – conceituada na análise e detalhamento de um fenômeno atual e suas variáveis;
- Pesquisa-ação – propõe uma intervenção participativa na situação em questão;

- Participante – o pesquisador se torna parte das intervenções apresentadas para o problema levantado.

Portanto, pode-se entender que, esta pesquisa tem um caráter próximo a definição de pesquisa bibliográfica e estudo de caso.

3.2 Materiais e Métodos

Para a elaboração do trabalho, primeiramente é feita a formulação da pergunta problema, que deve nortear todo o estudo. Após, são definidos os objetivos gerais e específicos e realizada uma revisão bibliográfica, com o fito de compreender todos os conceitos necessários.

A partir disso, a segunda parte do trabalho consiste no estudo de caso através de artigos e teses para obtenção de dados e informações dos tratamentos térmicos de pirólise lenta a tambor rotativo e de plasma pirólise. Nesse momento, são necessárias informações como a quantidade de RSU disponível em uma determinada situação, capacidade de resíduos sólidos processados em um determinado regime de tempo, quantidade de energia gerada pelo processo, escórias e resíduos secundários gerados, energia requerida pelo sistema para funcionamento e impacto no meio ambiente.

Por último, é realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos, listando as vantagens de cada processo.

A Figura 13 ilustra o fluxograma de desenvolvimento do projeto.

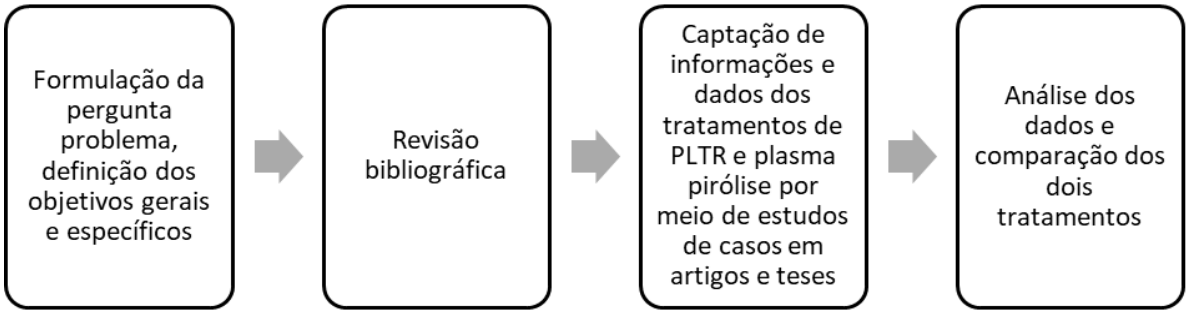

Figura 13: Fluxograma de desenvolvimento do projeto
Fonte: Pesquisa Direta (2022)

3.3 Variáveis e Indicadores

Variável é definida como tudo que pode assumir diferentes aspectos ou valores, dependendo do contexto (GIL, 2002). Indicadores se trata de uma ferramenta utilizada para obter informações sob algumas circunstâncias (MITCHELL, 1996).

A Tabela 4 demonstra as variáveis e os indicadores que serão utilizados para a elaboração deste trabalho.

Tabela 4: Tabela de variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
• Pirólise lenta a tambor rotativo • Plasma pirólise	• Quantidade de RSU processado • Energia consumida • Energia produzida • Impacto ambiental

Fonte: Pesquisa direta (2022)

Assim, para a análise e estudos, os principais indicadores são os resultados dos processos térmicos de pirólise lenta a tambor rotativo e plasma pirólise. Estes são influenciados pelos parâmetros de cada processo e são tratados para discussão e comparação.

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

É feita a coleta de dados necessários para esta pesquisa através de artigos e tese de doutorado já publicados e de acesso ao público geral.

3.5 Tabulação de Dados

As informações coletadas são inseridas em um documento através do *Microsoft Word*, após isso, o *software* é usado para anotações e filtragem do conteúdo necessário para a pesquisa.

3.6 Considerações Finais

Este capítulo trata do tipo de pesquisa, os métodos e materiais, as variáveis e indicadores, a coleta e a tabulação de dados utilizados neste trabalho para a conclusão dos objetivos traçados. No próximo capítulo são apresentados os dados e resultados extraídos da pesquisa realizada, para análise e discussão.

4 RESULTADOS

Para análise dos resultados é utilizado como base os artigos: *Gasification of Municipal Refuse-Derived Fuel as an Alternative to Waste Disposal: Process Efficiency And Thermochemical Analysis* (Gaseificação de Combustível Derivado de Lixo Municipal Como Alternativa à Eliminação de Resíduos: Eficiência do Processo e Análise Termoquímica) e *Design of an Industrial Solid Waste Processing Line to Produce Refuse-Derived Fuel* (Projeto de Uma Linha de Processamento de Resíduos Sólidos Industriais Para Produção de Resíduos Combustível), dos respectivos autores Trovó *et al* (2021) e Carvalho *et al* (2019), além, também, da tese de doutorado: Modelagem Para Dimensionamento de Gaseificador a Plasma: Aspectos Técnicos e Econômicos, da autora Paulino (2021).

4.1 Pirólise Lenta a Tambor Rotativo

Com o intuito de exemplificar o processo de pirólise lenta a tambor rotativo, será utilizado como base o projeto da usina localizada em Boa Esperança (MG), e a planta piloto localizada em Mauá (SP), e os seus respectivos dados.

4.1.1 Usina de Boa Esperança

A cidade de Boa Esperança conta com 40.000 habitantes (IBGE *apud* CARVALHO, 2019). Foi levado em conta um lixão localizado 3,5 km ao sul da área urbana, com produção diária estimada de 30 toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos (CARVALHO *et al*, 2019).

4.1.1.1 Estrutura da Usina

A planta da usina de Boa Esperança conta com equipamentos que visam maximizar o processo (CARVALHO *et al*, 2019). Conforme pode ser visto na Figura 14, a usina possui quatro britadores, um separador magnético, um soprador, um separador de metais não ferrosos e um secador rotativo tubular horizontal, tudo isso antes do reator (CARVALHO *et al*, 2019).

Foi feito uma caracterização dos resíduos sólidos urbanos antes de iniciar o processo de tratamento e foi encontrado os seguintes elementos (% em peso) (CARVALHO *et al*, 2019):

- Orgânico – 35,2%.
- Papel – 6,4%.

- Embalagens – 6,0%.
- Sintéticos – 8,8%.
- Têxteis – 10,0%.
- Têxteis de saúde – 12,2%.
- Plásticos – 8,8%.
- Vidro – 1,4%.
- Metais – 5,2%.
- Não classificados – 5,9%.

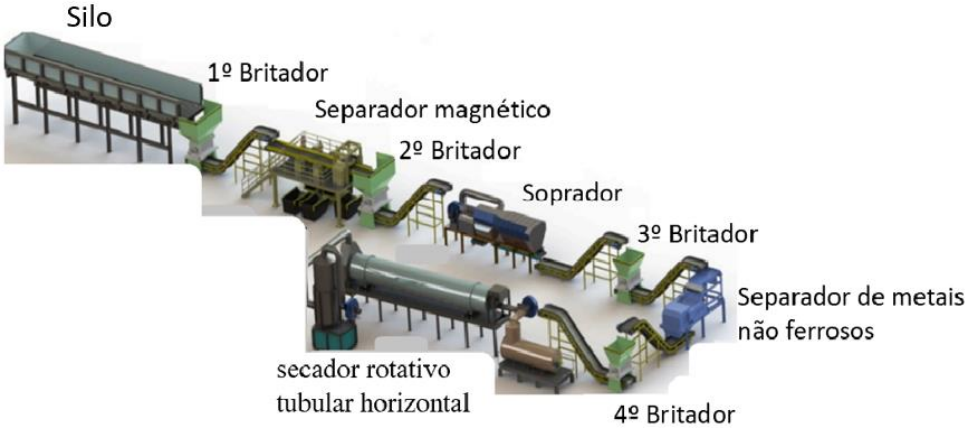

Figura 14: Desenho esquemático da usina de Boa Esperança - MG
Fonte: Adaptado de Carvalho (2019)

Conforme pode ser observado pela Figura 14, os resíduos sólidos urbanos armazenados no silo são alimentados no primeiro britador, que diminui a granulometria dos RSU para 80 mm (CARVALHO *et al*, 2019). Após, ocorre a etapa de coleta seletiva, em que uma esteira transporta os resíduos e oito operadores estão encarregados pela seleção de materiais recicláveis (CARVALHO *et al*, 2019). Logo, um separador magnético é responsável por retirar os metais ferrosos, os quais não foram removidos pelos trabalhadores da coleta seletiva (CARVALHO *et al*, 2019).

Ao chegar no britador secundário, os resíduos novamente sofrem redução na granulometria, agora com valor de 60 mm (CARVALHO *et al*, 2019). No soprador, é removido materiais de alta densidade, como vidros, pedras, e outros não orgânicos, além da remoção de umidade (CARVALHO *et al*, 2019). Assim, os resíduos chegam ao terceiro britador, reduzindo para 40 mm a granulometria, o que os tornam prontos para o separador de

metais não ferrosos, processo que, em sua primeira etapa apresenta-se uma pista vibratória com rolo magnético para captar os restos metálicos que não foram removidos nos processos anteriores, enquanto que na segunda etapa, há um eletroímã que gera um campo magnético para repelir metais não ferrosos, como cobre e alumínio (CARVALHO *et al*, 2019).

Assim, os RSU chegam ao quarto e último britador, que reduz a granulometria para 25mm e são conduzidos para o secador rotativo tubular horizontal (CARVALHO *et al*, 2019). Como é esperado, os resíduos nesse processo sofrem uma redução da umidade, além de serem homogeneizados, chegando nas seguintes especificações: Granulometria de 25 mm, umidade de 15% em peso, PCI (poder calorífico inferior) de 14,6 ± 1,3 MJ/kg, massa específica de 250 kg/m^3 e a vazão mássica de 1252 kg/h, enquanto que no início de todo o processo (antes do primeiro britador), os resíduos apresentavam umidade de 50% em peso e PCI de 9,3 MJ/kg e capacidade de trabalho de 2292 kg/h (CARVALHO *et al*, 2019).

Ao analisar tais dados, é possível afirmar que nesse processo de transformação dos resíduos sólidos urbanos em combustível para o processo de termodegradação houve uma perda de massa (diferença nos valores de capacidade de trabalho), justificada pelos tratamentos mecânicos aplicados aos resíduos (CARVALHO *et al*, 2019). Também é possível notar que, ao diminuir consideravelmente o teor de umidade (de 50 para 15% em peso), aumentou-se o teor de energia proporcionalmente à quantidade de combustível gerada, de 9,3 para 15,8 MJ/kg (CARVALHO *et al*, 2019).

Após todo o processamento dos resíduos sólidos urbanos, os mesmos são armazenados para enfim serem utilizados no reator de gaseificação (TROVÓ *et al*, 2021). A Figura 15 ilustra os equipamentos utilizados após o processo de tratamento dos RSU.

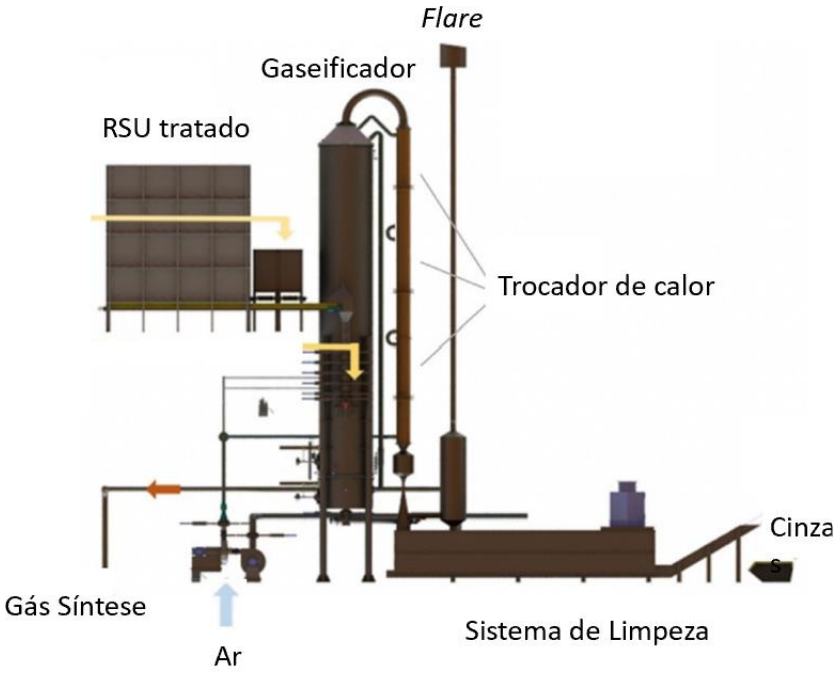

Figura 15: Desenho esquemático da planta piloto de gaseificação
Fonte: Adaptado de Trovó (2021)

A Figura 15 mostra, portanto, que o combustível derivado dos resíduos (CDR) armazenado em um silo vai para o gaseificador, e é nele onde ocorre o processo de termodegração (TROVÓ *et al*, 2021). Além do CDR, que é liberado gradativamente por três válvulas gavetas, também é inserido no fundo do reator areia de sílica (para garantir uma temperatura de operação uniforme na totalidade do reator, pois, esta possui propriedades mecânicas adequadas, incluindo dureza e resistência ao atrito e a temperatura), ar pré-aquecido e calcário (este último foi adicionado ao sistema para minimizar a formação de poluentes durante o processo termoquímico, uma vez que reage com o dióxido de enxofre, remove alcatrão e minimiza a formação de ácido clorídrico, ácido fluorídrico e ácido sulfídrico durante a combustão subsequente do gás de síntese) (SIKAWAR *apud* TROVÓ, 2021).

Assim ocorre todo o processo de transformação do CDR em gás de síntese (*syngas*) no gaseificador, este que é considerado um reator termoquímico de leito fluidizado circulante, construído em aço carbono e com isolamento térmico interno em tijolo refratário (TROVÓ *et al*, 2021). O gás é enviado para um ciclone axial localizado na parte interna superior do reator, este que tem a função de maximizar a produção de *syngas* e retirar parte do material particulado (TROVÓ *et al*, 2021). Com isso, o gás de síntese passa pelos trocadores de calor de tubo localizados na saída do reator, que resfriam o gás além de pré-aquecer o ar que

posteriormente vai para o reator (TROVÓ *et al*, 2021). Vale notar que, para controlar o fluxo mássico de *syngas*, é instalado um *flare*, que é controlado por meio de uma válvula reguladora de pressão (TROVÓ *et al*, 2021).

O sistema de limpeza do gás de síntese consiste em um sistema de lavagem de gases úmidos composto por um *venturi* (remoção dos particulados finos) e lavadores (condensação de água e neutralização de gases ácidos) (TROVÓ *et al*, 2021). Durante esta etapa, a temperatura do gás diminui e óxido de cálcio é adicionado à água para minimizar o cloro presente no gás de síntese, as cinzas e as partículas retidas são assentadas e extraídas por uma esteira de limpeza fina autoescorvante, após são descartadas em um balde por gravidade (TROVÓ *et al*, 2021).

O artigo considerou equipamentos do ciclo Rankine, uma vez que não há fabricantes de turbinas a gás nem motores de combustão interna para *syngas* no Brasil (TROVÓ *et al*, 2021). Por outro lado, existem diversas indústrias que produzem equipamentos do ciclo Rankine, como caldeiras, turbinas, unidades condensadoras e vasos de pressão (TROVÓ *et al*, 2021).

4.1.1.2 Projeção Dos Valores Resultantes

Para a projeção dos valores, foi levado em conta que a usina irá operar 24 horas por dia e processará 55 toneladas de RSU, sendo que 25 toneladas é proveniente do lixão da cidade de Boa Esperança e 30 toneladas corresponde ao produzido pela cidade (CARVALHO *et al*, 2019).

Primeiramente, de acordo com Carvalho *et al* (2019), os valores acerca de cada equipamento já descrito:

- Silo – 40 kW de potência, capacidade de carga de 60 toneladas e dimensões externas de 18 m (comprimento) x 3,5 m (largura) x 5,45 m (altura).
- Britador primário – 150 kW de potência, capacidade de trabalho de 6 toneladas por hora e dimensões externas de 6 m x 1,6 m x 0,685 m.
- Separador magnético – 1,5 kW de potência, capacidade de trabalho de 0,3 toneladas por hora e dimensões externas de 1,067 m x 0,99 m x 0,381 m.
- Britador secundário – 150 kW de potência, capacidade de trabalho de 6 toneladas por hora e dimensões externas de 5,7 m x 1,6 m x 0,685 m.

- Soprador – 24 kW de potência, capacidade de trabalho de 6 toneladas por hora, taxa de remoção de umidade de 127 kg/h e taxa de extração de resíduos de alta densidade de 500 kg/h.
- Britador terciário – 40,4 kW de potência, capacidade de trabalho de 6 toneladas por hora e dimensões externas de 3 m x 1,4 m x 2,3 m.
- Separador de metais não ferrosos – 6,6 kW de potência e capacidade de trabalho de 6 toneladas por hora.
- Britador quaternário – Capacidade de trabalho de 6 toneladas por hora.
- Secador rotativo tubular horizontal – 14,8 kW de potência, capacidade de trabalho de 6 toneladas por hora, dimensões externas de 16 m x 2,2 m x 5,1 m, teor de umidade na entrada de 30% em peso e na saída de 15% em peso (extração de água a uma taxa de 400,7 kg/h), temperatura do ar na entrada de 400 °C e na saída de 80 °C, fluxo de gás através do secador de 1551,28 Nm^3/h.

Vale lembrar que, os resíduos saem do secador rotativo com as seguintes especificações: Granulometria de 25 mm, umidade de 15% em peso, PCI de 14,6 ± 1,3 MJ/kg, 57% em peso de carbono, 7% em peso de hidrogênio e 35% em peso de oxigênio, massa específica de 250 kg/m^3 e a vazão mássica de 1252 kg/h (CARVALHO *et al*, 2019). Esse valor de umidade (15% em peso), permite uso direto do CDR em uma usina de gaseificação sem adição de combustível, além de possibilitar ser armazenado por três ou quatro meses, uma vez que o baixo teor de umidade inibe as reações enzimáticas e o crescimento de microrganismos como bactérias, fungos e leveduras (PASEK *apud* CARVALHO, 2019).

Para encontrar os valores citados anteriormente, foi feito uma caracterização dos resíduos com intuito de verificar as propriedades do biocombustível obtido a partir de resíduos sólidos urbanos e aterros isolados ou combinados (CARVALHO *et al*, 2019). A partir dessa caracterização, foi possível concluir que o CDR apresentou uma baixa contribuição para corrosão e saponificação devido ao baixo teor de sódio, potássio e cloro (0,21–1,5% em peso), além do teor de enxofre inferior a 0,11% e do cloro de 0,87%, considerados, portanto, inofensivos (abaixo de 0,3 e 1,0% respectivamente) (PUDDY *apud* CARVALHO, 2019). Ainda somado com o baixo teor de nitrogênio, pode-se concluir que são esperadas baixas emissões de SO_x e NO_x ao usar esse combustível (EDO *apud* CARVALHO, 2019).

Para a validação do projeto da usina de Boa Esperança, foi construída uma planta piloto na cidade de Mauá (SP), levando em considerações as características dos resíduos após os tratamentos (considerando o CDR gerado após serem tratados os resíduos sólidos urbanos como na usina de Boa Esperança) (TROVÓ *et al*, 2021).

O reator tem 10,7 m de altura e 0,83 m de diâmetro externo, operou oito horas por dia durante quatro dias, processando aproximadamente 300 kg/h de CDR (TROVÓ *et al*, 2021). Após o estágio de aquecimento necessário para a estabilização operacional, o reator operou em condições de regime permanente e a termodegradação ocorreu a 814 °C com uma variação de ± 25 °C ao longo da coluna (TROVÓ *et al*, 2021). O ar pré-aquecido é injetado na base do reator com uma vazão de 422 kg/h, o qual gera uma pressão de 0,14 bar e na condição estacionária a pressão dentro do gaseificador é positiva (TROVÓ *et al*, 2021). No topo da coluna do reator a pressão foi de 0,047 bar, enquanto que atingiu uma média de pressão de 0,077 bar com variação de ± 0,023 bar na parte inferior (TROVÓ *et al*, 2021).

A quantidade total de oxigênio necessário para a combustão completa do carbono e hidrogênio foi calculada usando a vazão mássica de alimentação do CDR (296,0 kg/h), e descontando a porcentagem de oxigênio (35%) presente nos resíduos tratados, sendo encontrado o valor de 512,08 kg/h (TROVÓ *et al*, 2021). Considerando a composição volumétrica teórica do ar (21 % O_2 e 79 % N_2), o fluxo de massa de ar ($\dot{m}_{Tar}$) foi encontrado no valor de 2196,82 kg/h (TROVÓ *et al*, 2021).

A potência térmica do reator foi calculada considerando uma eficiência térmica do reator de 75% (que por sua vez foi obtida empiricamente a partir de balanços de energia e dados experimentais), um consumo diário de CDR de 296 kg/h e o PCI do CDR de 14,6 ± 1,3 MJ/kg, chegando no valor de 3,24 GJ/h (TROVÓ *et al*, 2021). Lembrando que a eficiência térmica do reator é igual à eficiência do gás frio (CGE), o PCI médio de 4,6 ± 0,3 MJ/kg e a densidade de 1,18 ± 0,1 kg/m^3 do *syngas* (estimados utilizando cálculos estequiométricos e dados experimentais da coleta do gás de síntese), é possível encontrar o valor de $\dot{m}_{syngas}$ de 704,3 kg/h (TROVÓ *et al*, 2021).

Testes experimentais demonstraram que o gaseificador gerou cerca de 26% em peso de cinzas da vazão mássica de RSU, o que resulta na vazão mássica de cinzas ($\dot{m}_{cinzas}$) no valor de 76,96 kg/h (TROVÓ *et al*, 2021).

Como mencionado anteriormente, calcário ($CaCO_3$), foi adicionado ao sistema para minimizar a formação de poluentes durante o processo termoquímico, já que reage com o

dióxido de enxofre (SO_2), o que leva à produção de sulfato de cálcio ($CaSO_4$), (TROVÓ *et al*, 2021). Considerando o teor médio de enxofre no CDR (0,11% em peso) e sua vazão mássica (0,33 kg/h a partir de 296 kg/h de resíduos sólidos urbanos), seria necessário cerca de 1,02 kg/h de calcário para minimizar a emissão de poluentes (TROVÓ *et al*, 2021). Contudo, foi considerado um coeficiente de segurança de 1,2, resultando em uma dosagem de calcário ($\dot{m}_{calcário}$) de 1,22 kg/h (TROVÓ *et al*, 2021).

A partir do balanço de massa geral para o processo de gaseificação, calcula-se o fluxo de massa de ar necessário no processo de gaseificação ($\dot{m}_{Gar}$), no valor de 488,22 kg/h (TROVÓ *et al*, 2021).

ER, ou razão de equivalência, é um fator determinante no projeto de reatores autotérmicos, já que, reações exotérmicas fornecem a energia para o processo de gaseificação (ARENA *apud* TROVÓ, 2021). Esse parâmetro é representado pela razão entre a vazão mássica de ar necessária no processo de gaseificação ($\dot{m}_{Gar}$) e o fluxo de massa teórico de ar ($\dot{m}_{Tar}$) necessário para a combustão completa (TROVÓ *et al*, 2021). Considerando o valor de 488,22 kg/h para $\dot{m}_{Gar}$ e o valor de 2196,82 kg/h para $\dot{m}_{Tair}$ (ambos previamente calculados), o valor de ER será de aproximadamente 22,2%, o que significa que aproximadamente 22,2% em peso da massa total de CDR foram continuamente oxidados para a produção da energia necessária para o processo de gaseificação dentro do reator termoquímico (TROVÓ *et al*, 2021).

Foi feito também uma caracterização do gás de síntese, encontrando os seguintes valores: 61,5% de nitrogênio (N_2), sendo este o principal constituinte do *syngas*, 12,7% de CO_2, 9,8% de CO, 5,7% de H_2, 5,2% de CH_4, 2,2% de C_2H_4 e 1,8% de O_2, outros hidrocarbonetos foram encontrados em porcentagens abaixo de 1,0%, como o C_3H_8, C_2H_6, C_4H_{10}, C_5H_{12} e C_6H_{14} (TROVÓ *et al*, 2021). Também não foram encontradas quantidades significativas de hidrocarbonetos pesados ou alcatrão na composição do gás de síntese, essa ausência de alcatrão confirma a eficiência do reator termoquímico utilizados, além de evitar a obstrução das tubulações presentes no sistema, representando um ganho operacional importante (TROVÓ *et al*, 2021). Importante ressaltar, também, o PCI encontrado, no valor de 4,6 ± 0,3 MJ/kg, sendo considerado um valor coerente com outros trabalhos (TROVÓ *et al*, 2021).

Para a planta piloto, os resultados demostram que o processo é viável, uma vez que utiliza 7,1 toneladas por dia de combustível derivado de lixo municipal, mantendo uma

produção contínua de gás de síntese (704,3 kg/h), sendo capaz de recuperar 75% da energia térmica dos resíduos sólidos urbanos (TROVÓ *et al*, 2021).

Considerando o ciclo Rankine e o *syngas* produzido pela planta piloto como combustível renovável, seria possível produzir cerca de 1,0 t/h de vapor e 230 kW de eletricidade (esse valor já descontando o consumo de energia elétrica da própria planta para seu funcionamento), suficientes para fornecer energia para 800 pequenas residências com consumo médio mensal de 200 kWh por residência (EPE *apud* TROVÓ, 2021). Isso significa que, além de ser autossuficiente eletricamente, ela é capaz de gerar energia elétrica (que é vendida para a concessionária), além de ampliar a vida útil dos aterros e evitar impactos ambientais associados à contaminação do solo, água e ar promovida pelo descarte de resíduos em áreas abertas (TROVÓ *et al*, 2021).

Para a usina de Boa Esperança, o consumo de energia elétrica necessário para tratar o RSU foi determinado de acordo com as especificações dos equipamentos, sendo assim, a usina consumiria cerca de 334 kW opernado em plena capacidade (CARVALHO *et al*, 2019). Entretanto, o sistema foi planejado para operar com apenas 60% da capacidade elétrica máxima, ou seja, 200 kW são consumidos, enquanto a usina foi projetada para gerar 1500 kW de energia elétrica – considerando equipamentos do ciclo Rankine – (CARVALHO *et al*, 2019). Portanto, a mesma é capaz de processar 55 toneladas por dia de RSU, consumindo somente 14% da energia elétrica produzida e cerca de 4,5% da energia térmica produzida (o secador rotativo consome 186 kW das 4148 kW geradas), sendo assim, pode ser considerada autossuficiente e viável (CARVALHO *et al*, 2019).

4.1.1.3 Emissão

Além da caracterização do *syngas*, foi também realizada a caracterização dos gases resultantes de combustão (emissão de gases poluentes) do gás de síntese, uma vez que essas análises fornecem as informações necessárias para garantir que a tecnologia seja suficientemente limpa e viável do ponto de vista ambiental (TROVÓ *et al*, 2021). Concentrações médias de material particulado (17,6 mg/Nm^3), óxidos de enxofre (74,5 mg/Nm^3), óxidos de nitrogênio (98,1 mg/Nm^3), ácido clorídrico (7,0 mg/Nm^3) e ácido fluorídrico (3,3 mg/Nm^3), ficaram abaixo dos valores máximos estabelecidos pela legislação brasileira (30, 200, 400, 60 e 4 mg/Nm^3 respectivamente), visto também para metais e dioxinas/furanos (0,0086 ng/Nm^3), onde a máxima é de (0,1 ng/Nm^3) (TROVÓ *et al*, 2021).

Vale salientar que o processo de gaseificação em questão atende também aos padrões estabelecidos pela Resolução SMA 79/2009, que é mais rigorosa do que as normas nacionais brasileiras (Resolução CONAMA 316/2002), bem como padrões definidos para os EUA e Japão (TROVÓ *et al*, 2021). Levando em conta a Resolução SMA 79/2009 (SMA, 2009), o processo também foi eficiente em termos de emissões de hidrocarbonetos totais, uma vez que a concentração final (2,0 mg/Nm^3) representa apenas 10% do valor máximo permitido, sendo assim, se enquadrando no quesito de emissão e sustentabilidade ambiental (TROVÓ *et al*, 2021).

4.2 Plasma Pirólise

Para exemplificar o processo de plasma pirólise será utilizado como base a tese para obtenção do título de Doutora da autora Regina Franciélle Silva Paulino, onde foi dimensionado um gaseificador a plasma para processamento de resíduos sólidos do serviço de saúde (RSS), levando em conta a cidade de São Paulo (SP).

4.2.1 Usina a Plasma Hipotética - Estudo de caso

A cidade de São Paulo (SP) conta com 12.330.000 habitantes, segundo IBGE *apud* Paulino (2021), e no ano de 2020 foram coletadas 36872 toneladas de resíduos sólidos de saúde (SISCOR *apud* PAULINO, 2021). De acordo com o estudo feito, quatro plantas de plasma pirólise seria capaz de tratar a totalidade de RSS produzido pela cidade de São Paulo no período de um ano, equivalente a aproximadamente 101 toneladas por dia (PAULINO, 2021).

OS RSS demandam armazenamento frio e ventilado, além dos altos custos de descarte para os hospitais, controle rigoroso de emissões de poluentes para municípios, entre outros entraves (ERDOGAN *apud* PAULINO, 2021). O tratamento mais comum para os resíduos sólidos de saúde é o de incineração, contudo é liberado pelos gases de escape e cinzas altos teores de dibenzo-p-dioxinas e dibenzofuranos policlorados, considerados substâncias cancerígenas com poder de poluir o ar e os aterros sanitários (ERDOGAN *apud* PAULINO, 2021).

Entretanto, o RSS contém fisicamente até 54% de papel, 20% de têxtil, 26% de orgânico, 50% de plástico, 10% de metal e 15% de resíduos contendo vidro, e quimicamente, consiste em até 35% de carbono, 15% de hidrogênio, 16% de nitrogênio, 26% de oxigênio, 1% de enxofre e 3% de cloro, com um poder calorífico máximo de 8820 kcal/kg (ERDOGAN

apud PAULINO, 2021). Sendo assim, é possível afirmar que, ao analisar as características dos resíduos sólidos de saúde, elas se assemelham às dos resíduos sólidos urbanos que são utilizados para a geração de energia, ou seja, os RSS também têm potencial para serem usados como combustíveis (ERDOGAN *apud* PAULINO, 2021).

Atualmente, a maioria das instalações de plasma pirólise em funcionamento tratam RSU, cinzas de incineração e outros resíduos considerados nocivos (CAI *apud* PAULINO, 2021). Por outro lado, é importante salientar a alta adaptabilidade da matéria-prima à tecnologia de plasma térmico, isso significa que essa tecnologia é capaz de tratar os RSS (CAI *apud* PAULINO, 2021).

4.2.1.1 Estrutura

No estudo em questão, foi levado em conta duas configurações para geração de energia elétrica a partir do *syngas*, a primeira considera um motor a combustão interna (MCI) e a segunda um conjunto de turbina a gás (CTG) (PAULINO, 2021).

O gaseificador dimensionado no estudo possui as seguintes dimensões:

- Diâmetro de cada entrada de RSS – 0,402 m.
- Diâmetro de saída das cinzas – 0,030 m.
- Diâmetro de saída do gás - 0,188 m.
- Diâmetro interno do gaseificador a plasma – 1,300 m.
- Diâmetro total do gaseificador – 2,510 m.
- Altura interna do gaseificador – 2,617 m.
- Altura total do gaseificador – 3,827 m.
- Espessura do material isolante – 0,500 m.
- Espessura da manta térmica – 0,102 m.
- Espessura do revestimento de aço – 0,003 m.

A Figura 16 traz o desenho do gaseificador a plasma com a vista frontal em corte.

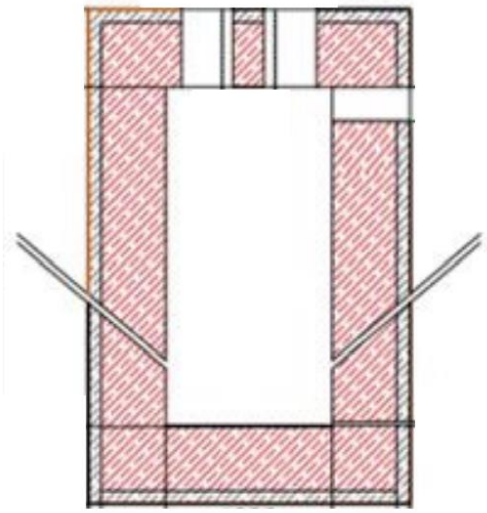

Figura 16: Vista frontal em corte do gaseificador a plasma
Fonte: Adaptado de Paulino (2021)

A partir da Figura 16 é possível notar a entrada dos RSS, que se dá pelas duas entradas superiores – para aproveitar o calor do gás de síntese para pré-aquecimento, conforme os resíduos descem pela extensão do reator até passar pelas tochas a plasma –, além da posição de saída do gás (saída lateral superior) e a posição das tochas (nas laterais) (PAULINO, 2021). Vale destacar que o gaseificador possui um formato cilíndrico e tem isolamento térmico composto por placa cerâmica, manta térmica e revestimento de aço inox, além de trabalhar com quatro tochas térmicas (PAULINO, 2021).

Tal processo, então, ocorre pela entrada dos RSS nas entradas superiores, ao mesmo tempo o plasma das tochas fornece a energia necessária para manter a temperatura dentro do reator em valores altos e suficientes para a dissociação de moléculas de gases produzidos pela decomposição dos resíduos sólidos de saúde (HRABOVSK *apud* PAULINO, 2021). Em consequência da temperatura elevada, os componentes inorgânicos dos materiais tratados são derretidos e, após a remoção e resfriamento, se solidificam, produzindo uma substância parecida com escória (HRABOVSK *apud* PAULINO, 2021). Os componentes orgânicos são volatilizados e decompostos em gás de síntese, devido a sua composição química (HRABOVSK *apud* PAULINO, 2021).

O estudo também considera a utilização de tochas a plasma de arco transferido, devido sua eficiência térmica de 95% e de necessitar de um fluxo de gás pequeno para seu funcionamento adequado (TIWARI *apud* PAULINO, 2021). Enquanto que a tocha de arco não-transferido possui eficiência de apenas 70% e requer uma taxa de fluxo de gás de formação de plasma relativamente alta para estabilizar o arco elétrico (TIWARI *apud* PAULINO, 2021). É válido mencionar que, a tocha de arco transferido exige um meio condutor ou um eletrodo externo para fechar o circuito elétrico (TIWARI *apud* PAULINO, 2021). A Figura 17 mostra o funcionamento de ambos os tipos de tochas a plasma.

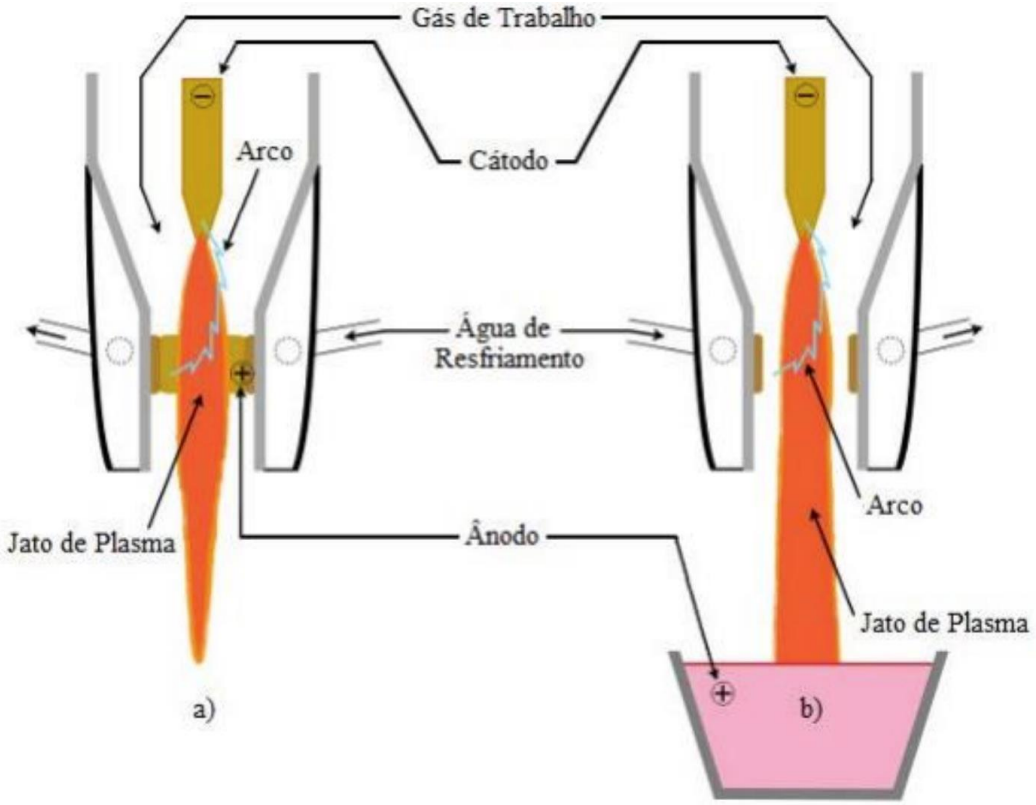

Figura 17: Modelos de tochas a plasma
Fonte: Paulino (2021)

Para o modelo apresentado na Figura 17 ao lado esquerdo (a), é caracterizado como tocha de arco não-transferido, onde o arco é inflamado entre dois eletrodos refrigerados por água dentro da tocha e o plasma sai da tocha através de um bico (geralmente pelo ânodo), enquanto que a direita (b), é mostrado a tocha de arco transferido, onde o material a ser tratado está em contato direto com o eletrodo auxiliar (HRABOVSKY *apud* PAULINO, 2021).

Para utilizar o *syngas* como combustível, se faz necessário um sistema de limpeza e resfriamento após o gaseificador, independendo da configuração (MCI ou CTG) (PAULINO,

2021). Portanto, após passar por um trocador de calor, o gás de síntese é levado ao sistema de limpeza e, após isso, queimado em um motor de combustão interna ou em um conjunto de turbina (PAULINO, 2021). A Figura 18 e a Figura 19 traz um fluxograma de cada sistema.

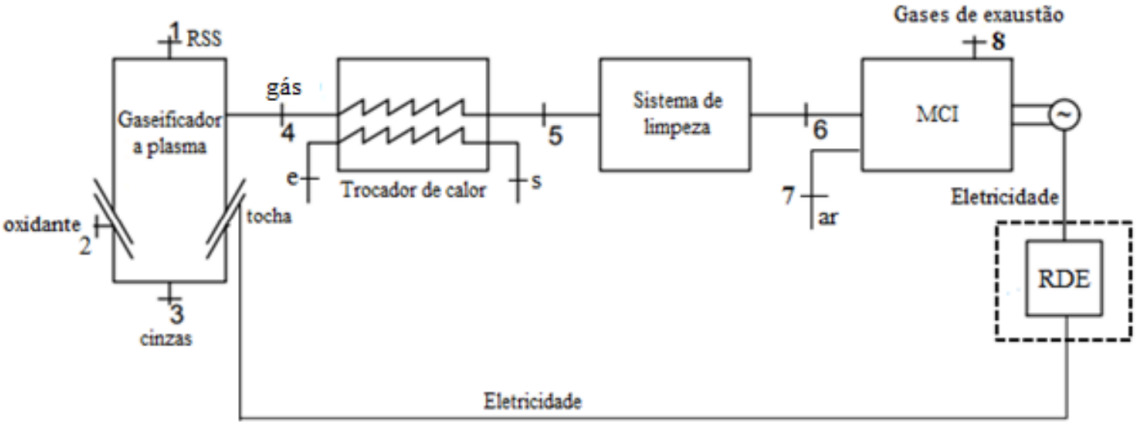

Figura 18: Sistema integrado de um gaseificador a plasma e um motor de combustão interna
Fonte: Paulino (2021)

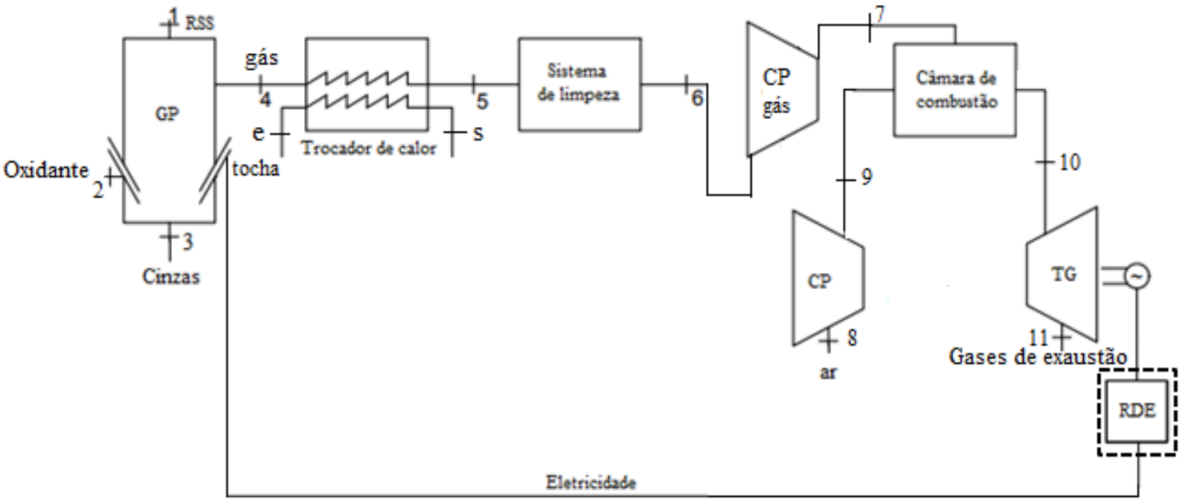

Figura 19: Sistema integrado de um gaseificador a plasma e um conjunto de turbina a gás
Fonte: Paulino (2021)

Importante notar que, de acordo com a Figura 18 e a Figura 19, é gerado energia elétrica proveniente da queima do *syngas*, que é vendida para a rede de distribuição de eletricidade (RDE), e que, por conseguinte, fornece potência elétrica para o funcionamento do gaseificador (PAULINO, 2021).

Para a primeira configuração, foi selecionado o motor de combustão interna da marca Caterpillar modelo DM5398, capaz de gerar até 3105 kW de potência elétrica (PAULINO, 2021). Para a segunda configuração, foi selecionado o conjunto de turbinas a gás da marca

Rolls-Royce modelo 501 – KB5S, capaz de gerar 3897 kW de potência elétrica, além do acréscimo de um compressor de gás para elevar a pressão do *syngas* (PAULINO, 2021).

Na seleção do MCI em questão, foi considerado a eficiência de geração de eletricidade, que é determinada pela potência suprida pelo gás e pela potência elétrica do motor de combustão interna (PAULINO, 2021). O estudo considerou uma eficiência de geração de eletricidade de 20%, enquanto que por meio de equações, foi encontrado um valor de PCI do gás de 13754 kJ/kg, o que fornece uma capacidade de produção de 2772 kW de potência elétrica em um motor de combustão interna, portanto, o modelo selecionado levou em conta esses valores (PAULINO, 2021).

Na seleção do CTG, também foi considerado os mesmos parâmetros anteriormente citados, ou seja, eficiência de geração de eletricidade, nesse caso determinado pela potência suprida pelo gás e pela potência elétrica da turbina a gás. (PAULINO, 2021). O estudo considerou uma eficiência de geração de eletricidade de 25%, enquanto que o valor de PCI do gás de 13754 kJ/kg, o que fornece uma capacidade de produção de 3741 kW de potência elétrica em um conjunto de turbina a gás (a diferença para o MCI é devido a maior eficiência do CTG) (PAULINO, 2021).

4.2.1.2 Projeção dos Valores Resultantes

Primeiramente, foi determinado a composição e quantidade de gás produzido durante o processo de gaseificação, para isso foi feito uma análise termodinâmica para o sistema em estado de equilíbrio para a faixa de temperatura de 27 até 2027 °C, pressão atmosférica de 0,1 MPa e a composição química do gás produzido na temperatura com $\alpha = \alpha_{máximo}$ (melhor ponto de operação da gaseificação a plasma do RSS) (PAULINO, 2021). Foi levado em conta que, os principais componentes em massa do RSS são 37,3% de oxigênio, 31,6% de carbono e 20,8% de água (PAULINO, 2021).

Como $\alpha_{máximo}$ encontrado foi de 2,25, a temperatura considerada (ponto de operação do gaseificador) será a de 767 °C (PAULINO, 2021). Para esta temperatura, o gás de síntese é composto por 63,65% em massa de CO e 5,35% em massa de H_2, enquanto que o volume específico é de 5,13 m^3/kg, diferença de entalpia (ΔH) é de 5673 kJ/kg e o PCI é de 13754 kJ/kg (PAULINO, 2021).

No trabalho, também é mencionado que foi considerado o processamento de saco de 20 kg (100 l) de RSS (maior recipiente de acordo com a ABNT NBR 9191/750), de forma que

assim, os sacos menores possam ser processados sem alteração do diâmetro de entrada de RSS (PAULINO, 2021).

O gaseificador dimensionado tem capacidade de 0,29 kg/s, a partir disso o número de sacos de RSS que podem ser processados simultaneamente é de quatro sacos, portanto, pode-se concluir que os fluxos mássicos e a massa específica do gás serão (PAULINO, 2021):

- Fluxo mássico de RSS = 0,290 kg/s.
- Fluxo mássico de gás = 0,021 kg/s.
- Fluxo mássico de cinzas = 0,269 kg/s.
- Massa específica do gás = 0,195 kg/m^3.

Para processar esse volume de material (0,29 kg/s), a potência elétrica da tocha será de 1728 kW, com isso, será considerado o uso de quatro tochas a plasma, cada uma com potência de 500kW (PAULINO, 2021).

Abaixo segue os valores das propriedades energéticas do RSS, do gás, dos gases de exaustão e eficiência energética do gaseificador a plasma (PAULINO, 2021):

- Calor específico médio a pressão constante do gás = 1,87 kJ/kg.K.
- Calor específico a pressão constante do gás de exaustão = 1,23 kJ/kg.K.
- Energia suprida pelo gás = 14966 kW.
- Poder calorífico inferior do RSS = 19006 kJ/kg.
- Poder calorífico inferior do gás = 13754 kJ/kg.
- Constante dos gases para o gás = 0,49 kJ/kg.K.
- Constante dos gases para o gás de exaustão = 0,27 kJ/kg.K.
- Eficiência energética do gaseificador a plasma = 49,33%.

Considerando a primeira configuração (MCI), foi possível concluir que o motor de combustão interna tem capacidade de produzir 2772,54 kW processando o gás de síntese, enquanto que a segunda configuração (CTG), é capaz de produzir 3741,63 kW de potência processando o mesmo combustível, diferença justificada pela maior eficiência do conjunto de turbina a gás (PAULINO, 2021). Contudo, a potência elétrica requerida pelas tochas é de 7476,51 kW, o que significa que a primeira configuração supre somente 37,1%, enquanto que a segunda consegue suprir 50,1% da demanda de eletricidade da tocha (PAULINO, 2021).

Para análise exergética, foram feitos cálculos considerando a potência do compressor de ar e a gás com valores de 1954,2 e 1126,9 kW, respectivamente, chegando assim nas seguintes eficiências exergéticas para a primeira configuração (PAULINO, 2021):

- Gaseificador = 38,47%.
- Trocador de calor = 96,89%.
- Motor de combustão interna = 24,84%.

Enquanto que, para a segunda configuração os valores foram (PAULINO, 2021):

- Gaseificador = 38,47%.
- Trocador de calor = 95,37%.
- Compressor de gás = 80,95%.
- Compressor de ar = 92,05%.
- Câmara de combustão = 85,23%.
- Turbina a gás = 27,58% (ou 89,86% considerando a exergia dos gases).

Por esses valores, pode-se concluir que os equipamentos com processo de combustão são os que possuem a menor eficiência exergética, sendo a do gaseificador devido as reações químicas que não podem ser reversíveis e pela baixa eficiência de conversão de RSS e eletricidade em gás (PAULINO, 2021). Além do gaseificador, o motor de combustão interna e a câmara de combustão apresentaram as menores eficiências de cada configuração, devido as reações de combustão também não serem reversíveis, sendo impossível produzir gás (gás de síntese) a partir dos gases de exaustão e calor (PAULINO, 2021).

Analisando a parte financeira do projeto, é encontrado que a primeira configuração (MCI) tem o custo de produção de eletricidade maior que o da segunda configuração (CTG), uma vez que o conjunto de turbina a gás tem o menor custo de produção de gás e produz mais eletricidade do que o motor a combustão interna (PAULINO, 2021). Dessa forma, torna-se mais viável optar por instalar um conjunto de gaseificação a plasma associado ao conjunto turbina a gás (PAULINO, 2021).

Mesmo não tendo um saldo positivo na geração de energia elétrica, a tecnologia de gaseificação a plasma se mostra vantajosa, uma vez que quando considerado os métodos atualmente empregados no Brasil para tratamento de RSS (autoclavagem e incineração), o *payback* da plasma pirólise se mostra vantajoso, sendo de sete a dez anos para a primeira

configuração e, de seis a nove anos para a segunda (quando levado em conta a autoclavagem), enquanto que quando considerado a incineração o *payback* é de três a cinco anos (devido ao alto custo cobrado pelo descarte através desta tecnologia) (PAULINO, 2021). Isso significa que, em longo prazo, o sistema de gaseificação a plasma de resíduos sólidos de saúde é mais viável economicamente que os métodos utilizados hoje, mesmo necessitando de um investimento inicial alto (PAULINO, 2021).

4.2.1.3 Emissão

No trabalho em questão, não foi feito uma análise acerca da emissão de poluentes do sistema fictício de tratamento de RSS, entretanto, devido ser incorporado ao projeto de ambas as configurações um sistema de limpeza do gás, é esperado que seja removido os elementos considerados poluentes, como cloretos, enxofre, mercúrio, material particulado e outros metais voláteis (PAULINO, 2021). Podendo concluir que o sistema atende no que tange emissão e sustentabilidade ambiental (PAULINO, 2021).

Vale ressaltar que a temperatura estabelecida para o fluxo de gás na saída do trocador de calor e entrada do sistema de lavagem foi de 460 °C para a primeira configuração (MCI), e 320 °C para a segunda configuração (CTG) – diferença justificada pela necessidade de acrescentar o compressor de gás para elevar a pressão e que, consequentemente, eleva a temperatura do fluido no segundo sistema –, respeitando assim a temperatura de 512 °C, sendo esta a máxima onde o sistema de lavagem opera sem perda de eficiência (GIMBUN *apud* PAULINO, 2021).

Lembrando que na caracterização do *syngas*, foi encontrado valores relativamente baixos de elementos poluentes em fração mássica, são eles: 0,16% em massa de HCl (0,0756% em volume), 0,22% em massa de H_2S (0,1073% em volume), 0,57% em massa de CH_4 (0,5963% em volume) e 0,54% em massa de N_2 (0,3250% em volume) (PAULINO, 2021).

4.3 Possibilidade de aplicação

Pode ser citado como uma possibilidade de aplicação dos métodos apresentados neste trabalho a cidade de Governador Valadares (MG). Segundo dados da prefeitura, no ano de 2012, o município contava com 266.190 habitantes e coletou cerca de 62.131 toneladas de RSU (170 t/ dia) e 99 toneladas de RSS (0,27 t/ dia).

Neste mesmo ano foram gastos 6.133.629,84 reais com a coleta de resíduos sólidos urbanos e 91.811,93 com a coleta de resíduos sólidos de saúde. Como a cidade não possui um aterro sanitário e nem um processo de tratamento de resíduos sólidos, foram gastos 7.845.593,25 reais para que uma empresa terceirizada realizasse o serviço de transporte e disposição final dos RSU no aterro sanitário localizado na cidade de Santana do Paraíso (100 km de distância). Da mesma forma, foram gastos 240.201,32 reais para que outra empresa terceirizada procedesse com o mesmo serviço com os RSS, sendo levados para um autoclave situado na cidade de Ubá (360 km de distância).

Diante desse cenário, é possível concluir que uma cidade desse porte deveria investir em um processo para tratamento dos resíduos em questão. Dessa forma, além de poupar aproximadamente 14,5 milhões de reais por ano, há oportunidade de gerar empregos e economia para o município com produção de energia elétrica a partir do método selecionado, tudo isso sem agredir ao meio ambiente e sem prejudicar o bem-estar da sociedade. Por fim, é válido destacar que no Brasil tem-se vários centros urbanos em condições similares, sendo potenciais para aplicação de métodos de tratamento de resíduos.

5 CONCLUSÃO

Ao analisar o âmbito econômico, pode-se afirmar que, o sistema de pirólise lenta a tambor rotativo é bastante atrativo, uma vez que não exige equipamento com alta complexidade e nem resistente a temperaturas muito elevadas. Além de ser considerado um processo autossuficiente, sendo que a usina necessita apenas de 14% da energia elétrica e 4,5% da energia térmica produzidas (1500 e 4148 kW, respectivamente), para o seu funcionamento, podendo assim, vender o restante da eletricidade gerada para a concessionária.

Em contrapartida, a tecnologia de plasma pirólise não resulta em um saldo positivo no requisito de geração de energia. Tal fato ocorre devido a essa tecnologia requerer 7476,51 kW para seu funcionamento - um valor consideravelmente alto e justificado pelo uso de tochas a plasma - além de gerar somente 37,1% desse valor quando associado ao MCI e 50,1% quando associado ao CTG, ou seja, não é autossuficiente eletricamente.

Apesar de não apresentar um ganho econômico (já que é necessário comprar energia elétrica da concessionária), o sistema de gaseificação a plasma é, ainda, financeiramente mais atrativa que as tecnologias hoje aplicadas no país para descarte e tratamento de resíduos sólidos de saúde (autoclavagem e incineração), uma vez que, de acordo com a análise econômica elaborada pela autora da tese, esses dois métodos apresentam um alto custo para o Estado, o que faria com que ao longo dos anos o sistema de gaseificação a plasma sairia mais em conta.

Vale lembrar que, mesmo não apresentando um lucro com a geração de energia elétrica igual a tecnologia de pirólise lenta, a gaseificação a plasma tem a vantagem de processar resíduos com diferentes características, ou seja, além dos resíduos sólidos urbanos utilizado pela usina de pirólise lenta a tambor rotativo, ela pode trabalhar também com outros tipos de matéria-prima, como o caso dos RSS, e isso é possível devido a alta temperatura de operação do gaseificador (767 °C no caso do estudo analisado). Ademais, as temperaturas suficientemente altas resultam em uma distribuição homogênea de calor, que pode ser facilmente mantida em todo o reator, contribuindo para a substancial redução da produção de alcatrão e outras moléculas complexas, e, também, na produção de gás de síntese de alta qualidade.

Além disso, etapas de preparação dos resíduos na gaseificação a plasma não se fazem necessário, sendo processado os RSS ainda dentro dos sacos de armazenamento, o que exclui

vários equipamentos e processos utilizados em outros métodos de tratamento de resíduos. É possível afirmar, então, que o sistema de plasma pirólise é mais versátil que uma usina de PLTR.

Portanto, ambos os processos são interessantes e viáveis em diferentes aspectos. Ambientalmente, os dois são ecologicamente corretos, uma vez que as emissões de ambos são menores que os estabelecidos pelas normas regulamentadoras - não agredindo o meio ambiente - além de serem alternativas para o descarte de resíduos, substituindo lixões e aterros sanitários, com destaque para a gaseificação a plasma devido a sua versatilidade e adaptabilidade. Economicamente, ambos também são promissores, gerando energia elétrica a partir do tratamento dos resíduos, sendo a usina de PLTR mais atraente devido ao seu saldo energético positivo. Por fim, são tecnologias que podem ser implementadas em diversos locais e cidades, sendo necessário analisar previamente as premissas do projeto para determinar qual será mais vantajosa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos.** [s. l.]. 1992.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896: Aterros de Resíduos Não Perigosos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação.** [s. l.]. 1997.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação.** [s. l.]. 2004.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama Dos Resíduos Sólidos no Brasil.** [s. l.]. 2021.

BANK, W. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.** [s. l.]. 2018.

BERTO, A. M. **A Percepção Ambiental Sobre a Geração de Resíduos Sólidos no Bairro Paisagem Colonial**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo. São Roque (SP). 2020.

CARDOSO, R.; BARROS, C. F. O. **Projeto P&D ANEEL 0394-1238/2012: Desenvolvimento de "Unidade de Aproveitamento Energético de Resíduos" Através de Tecnologia de Pirólise Lenta a Tambor Rotativo na Aplicação de Solução Socioambiental.** Universidade Federal Fluminense. Niterói (RJ). 2012.

CARVALHO, S. R.; INFIESTA, L. R.; FERREIRA, C. R. N.; TROVÓ, A. G.; BORGES, V. L. **Design of an Industrial Solid Waste Processing Line to Produce Refuse-Derived Fuel**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia (MG). 2019.

COSER, I. S. **Estudo e Análise de Geração de Energia Elétrica Utilizando de Resíduos Sólidos Urbanos**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis (SC). 2021.

FEAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Panorama da Destinação Dos Resíduos Sólidos Urbanos no Estado de Minas Gerais em 2012**. [s. l.]. 2012.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

GOMES, C. E. P. S. **Resíduo Sólido Urbano é Energia Jogada no Lixo.** Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro (RJ). 2018.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Perfil Dos Municípios Brasileiros.** [s. l.]. 2008.

LIMA, L. M. **Lixo: Tratamento e Biorremediação**. 3.ed. São Paulo: Hemus Editora, p. 11. 2004.

LOPES, A. O. F. **Geração De Energia Elétrica a Partir dos Resíduos Sólidos Orgânicos Portuários.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro (RJ). 2015.

MARCONI, M. D. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia de Trabalho Científico.** 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

PAULINO, R. F. S. **Modelagem Para Dimensionamento de Gaseificador a Plasma: Aspectos Técnicos e Econômico.** Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá (SP). 2021.

PNRS. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Lei nº 11.445**. [s. l.]. 2007.

PNRS. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Lei nº 12.305.** [s. l.]. 2010.

RAMOS, R. A.; CAMATTA, D. C.; CARDOSO, R.; NARCIZO, R. B. **Uma Possível Solução Para a Questão Dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: O Caso da Usina de Pirólise Lenta em Boa Esperança (MG)**. Universidade Federal Fluminense. Niterói (RJ). 2014.

SOBRINHO, R. S. A. **Desenvolvimento de Uma Ferramenta Para Análise de Dados de Gerenciamento de RSU no Brasil e Prospecção de Oportunidades Para Recuperação Energética.** Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá (SC). 2020.

SZIGETHY, L.; ANTENOR, S. **Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: Desafios Tecnológicos, Políticos e Econômicos.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília (DF). 2020.

TROVÓ, A. G.; FERREIRA, C. R. N.; INFIESTA, L. R.; MONTEIRO, V. A. L.; STARLING, M. C. V. M.; JÚNIOR, W. M. S.; BORGES, V. L.; CARVALHO, S. R. **Gasification of Municipal Refuse-Derived Fuel as an Alternative to Waste Disposal: Process Efficiency And Thermochemical Analysis.** Universidade Federal de Uberlândia (MG). Uberlândia. 2021.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.