



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

**TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TÉRMICA PARA APROVEITAMENTO DE
RESÍDUOS POLIMÉRICOS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

JACYELLI CARDOSO MARINHO DOS SANTOS

CAMPINA GRANDE/PB

2022

**TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TÉRMICA PARA APROVEITAMENTO DE
RESÍDUOS POLIMÉRICOS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

JACYELLI CARDOSO MARINHO DOS SANTOS

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do título de Doutor(a) em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Nilton Silva.

CAMPINA GRANDE/PB

2022

S237t

Santos, Jacyelli Cardoso Marinho dos.

Tecnologias de conversão térmica para aproveitamento de resíduos polímeros : modelagem e simulação / Jacyelli Cardoso Marinho dos Santos. - Campina Grande, 2022.

178 f. il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. José Nilton Silva."

Referências.

1. Pirólise. 2. Gaseificação. 3. Aspen Plus. 4. Ciclo Otto. I. Silva, José Nilton. II. Título.

CDU 66.092-977(043)

**TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TÉRMICA PARA APROVEITAMENTO DE
RESÍDUOS POLIMÉRICOS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Tese aprovada em: 29/06/2022

BANCA EXAMINADORA



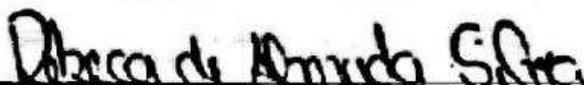
Prof. Dr. José Nilton Silva
Orientador - UFCG



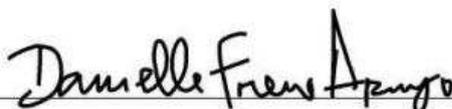
Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos
Examinador Interno - UFCG



Prof. Dr. Aldre Jorge Morais - UFCG
Examinador Externo - UFCG



Prof^a. Dr^a. Rebeca de Almeida Silva
Examinador Externo - UEPB



Prof^a. Dr^a. Danielle Freire Araújo
Examinador Externo

CAMPINA GRANDE/PB

2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
UNIDADE ACADEMICA DE ENGENHARIA QUIMICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900
Telefone: (83) 2101-1100
Site: <http://cct.ufcg.edu.br>

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO TÍTULO DE DOUTOR, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA
QUÍMICA, REALIZADA EM 29 DE JUNHO DE 2022

(Nº 125)

CANDIDATO(A): **Jacyelli Cardoso Marinho dos Santos**. COMISSÃO EXAMINADORA: Wagner Brandão Ramos, Prof., Dr., UFCG/ Presidente da Sessão e Examinador Interno, José Nilton Silva, Prof., Dr., UFCG/ **Orientador**, Danielle Freire Araújo, Prof^a., Dr^a., UNINASSAU/ Examinadora Externa, Aldre Jorge Moraes Barros, Prof., Dr., UFCG/ Examinador Externo, Rebeca de Almeida Silva, Prof^a., Dr^a., UEPB/Examinadora Externa. TITULO DA TESE: **“TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TÉRMICA PARA APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO”**. ÁREA CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos Químicos - HORA DE INÍCIO: **08:00 horas** – LOCAL: **Sala Virtual, em virtude da suspensão de atividades na UFCG decorrente do corona vírus**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, sendo **APROVADO**. Face à aprovação, declara o(a) Presidente da Comissão, achar-se a examinada, legalmente habilitado a receber o **Grau de Doutor**, no domínio da Engenharia Química, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como direito, providenciar a expedição do Diploma, o que a mesma faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Maricé Pereira de Araújo - Secretária - do PPGEQ e os membros da Comissão Examinadora e o(a) candidato(a). Campina Grande, 29 de junho de 2022.

Maricé Pereira de Araújo

Secretária

Wagner Brandão Ramos, Prof. Dr. UFCG

Presidente da Comissão e Examinador Interno

José Nilton Silva, Prof. Dr. UFCG

Orientador

Danielle Freire Araujo, PROTª. DRª. UNINASSAU

Examinadora Externa

Aldre Jorge Morais Barros, Prof. Dr. UFCG

Examinador Externo

Rebeca de Almeida Silva, Profª. Drª. UEPB

Examinadora Externa

Jacyelli Cardoso Marinho dos Santos

Candidata



Documento assinado eletronicamente por **WAGNER BRANDAO RAMOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/06/2022, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE NILTON SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 29/06/2022, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jacyelli Cardoso Marinho dos Santos, Usuário Externo**, em 29/06/2022, às 10:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARICE PEREIRA DA SILVA, SECRETÁRIA**, em 29/06/2022, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALDRE JORGE MORAIS BARROS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/06/2022, às 10:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **REBECA DE ALMEIDA SILVA, Usuário Externo**, em 11/07/2022, às 20:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2501933** e o código CRC **7D2B3D42**.

LISTRA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta Mundial de energia (1990 a 2017).....	22
Figura 2. combustíveis fósseis: estimativa em anos das reservas restantes	23
Figura 3. Investimento em energia renovável (2004 a 2015)	24
Figura 4. Investimento em energia renovável (2004 a 2015)	25
Figura 5. Geração de RSU no Brasil (2016-2017).....	29
Figura 6. Geração de RSU no Brasil (2017-2018).....	30
Figura 7. Plata de pirólise.....	39
Figura 8. Influência da temperatura no rendimento dos produtos	42
Figura 9. Zonas de gaseificação (Leito Fixo).....	47
Figura 10. Aplicações do gás de síntese.....	54
Figura 11. Esquema do funcionamento de um MCI com pistão	56
Figura 12.fases do funcionamento do MCI.....	57
Figura 13. Fluxograma da gaseificação dos RSU no Aspen plus.....	74
14. Esquema do processo de pirólise realizado por Khan et al. (2016)	79
15. Fluxograma das etapas da simulação	80
Figura 16. Fluxograma do processo de pirólise no Aspen Hysys.....	81
Figura 17. Seleção do modelo termodinâmico	83
Figura 18. Seleção do modelo termodinâmico com auxílio do “methods assistant” ..	84
Figura 19. Seleção do modelo termodinâmico	84
Figura 20. Reação de pirólise.....	85
Figura 21. Unidade de pré-tratamento do resíduo.....	86
Figura 22. Reator de pirólise (reator de conversão)	86
Figura 23. Sistema de resfriamento e geração da fração líquida	88
Figura 24.Etapas realizadas para simulação do processo	100
Figura 25. Diagrama do processo modelado no Aspen Plus	101
Figura 26. Configurações globais.....	101
Figura 27. Seleção dos componentes envolvidos na simulação	103
Figura 28.Janela de introdução dos dados referentes a análise “Proxanal” do PE .	104
Figura 29. Janela de introdução dos dados referentes a análise “Ultanal” do PE ...	105
Figura 30. Janela de introdução das variáveis termodinâmicas da corrente de água	105
Figura 31. Reação do secador	106
Figura 32. Reação do secador	107
Figura 33. Janela de introdução dos dados referentes as condições de operação do reator de pirólise.....	108
Figura 34.Definição das variáveis para cálculo do rendimento	109
Figura 35. Rotina de cálculo para conversão em base seca da composição em base única.....	109
Figura 36. Janela de introdução dos dados referentes a análise “Proxanal” do A	110
Figura 37. Janela de introdução dos dados referentes a análise “Ultanal” do ASH	110
Figura 38. Janela de especificações das variáveis termodinâmicas do gaseificador	111

Figura 39. Janela de especificações das variáveis termodinâmicas do gaseificador	112
Figura 40. Constituição do Gás obtido no processo de gaseificação simulado.....	112
Figura 41. Planta de gaseificação e de geração de potência	121
Figura 42. Localização geográfica do Município de Campina Grande-PB	127
Figura 43. Mapa da localização do Aterro Sanitário de Campina Grande, Paraíba, Brasil	127
Figura 44. Etapas do estudo de caso	129
45. Disposição de RSU no ASCG por Municípios e Empresas Privadas de 2015 a 2021	143
Figura 46. Composição gravimétrica dos RSU do ASCG em 2018.....	149
Figura 47. Composição volumétrica dos RSU do ASCG.....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Oferta interna de energia.....	26
Tabela 2. Composição Gravimétrica dos RSU em diversos países	32
Tabela 3. Composição Gravimétrica dos RSUs no Brasil (base seca).....	33
Tabela 4. Poder calorífico dos polímeros e de alguns combustíveis.....	78
Tabela 5. Variáveis termodinâmicas do fluxo de entrada do PS	85
Tabela 6. apresenta as variáveis termodinâmicas do reator de pirólise	86
Tabela 7. Balanço de massa do processo simulado	88
Tabela 8. Composição da fração líquida do óleo de pirólise	89
Tabela 9. Composição da fração gasosa do óleo de pirólise	90
Tabela 10. Propriedades físicas do óleo de pirólise	91
Tabela 11. Análise Próxima do PE.....	102
Tabela 12. Análise última do PE	102
Tabela 13. Variáveis termodinâmicas da corrente de alimentação do PE	104
Tabela 14. Condições de reação do RStoic	106
Tabela 15. Condições de reação do Reator de pirólise.....	108
Tabela 16. Concentração de H ₂ no gás de síntese	114
Tabela 17. Concentração de CH ₄ no gás de síntese.....	114
Tabela 18. Poder Calorífico do gás de síntese.....	115
Tabela 19. Tabela de conversão de polímero em gás de síntese	135
Tabela 20. Fração mássica dos compostos presentes no gás de síntese	136
Tabela 21. Histórico de preços dos materiais recicláveis	140
Tabela 22. Média anual de RSU dispostos no ASCG	143
Tabela 23. Quantidades mensais de RSU dispostos no ASCG	144
Tabela 24. Composição gravimétrica dos RSU em anos distintos	148
Tabela 25. Quantidades mensais de resíduos polimérico dispostos no ASCG.....	151
Tabela 26. Geração mensal de gás de síntese em toneladas	154
Tabela 27. . Estimativa mensal da quantidade de trabalho líquido teoricamente gerado	158
Tabela 28. Projeção da quantidade de gás de síntese gerado a partir do processo de gaseificação	160
Tabela 29. Estimativa das quantidades anuais de materiais recicláveis encaminhados para o ASCG.....	166
Tabela 30. Estimativa do total arrecadado com a venda dos materiais recicláveis (2015 – 2021)	168
Tabela 31. . Estimativa da quantia arrecada com a comercialização dos materiais recicláveis.....	169

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Critérios para Classificação de Polímeros	34
Quadro 2. Parâmetros que afetam a distribuição dos produtos de pirólise	40
Quadro 3. Reações do processo de gaseificação	48
Quadro 4. Principais agente de gaseificação	51
Quadro 5. Entrada de dados no Aspen Hysys dos componentes envolvidos no processo.....	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Concentração de H ₂ no gás de síntese	114
Gráfico 2. Concentração de CH ₄ no gás de síntese	115
Gráfico 3. Poder Calorífico do gás de síntese	116
Gráfico 4. Quantidade mensal de RSU disposto no ASCG	145
Gráfico 5. Estimativa dos RSU acumulados no ASCG (2015 a 2021)	146
Gráfico 6. Projeção dos RSU dispostos no ASCG	147
Gráfico 7. Projeção do acúmulo dos RSU no ASCG até o ano de 2026	147
Gráfico 8. Quantidades mensais de resíduos poliméricos dispostos no ASCG	151
Gráfico 9. Média anual de resíduos poliméricos dispostos no ASCG	152
Gráfico 10 Estimativa dos RSU acumulados no ASCG (2015 a 2021)	153
Gráfico 11. Estimativa dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG.....	153
Gráfico 12 Estimativa dos resíduos poliméricos acumulados até o ano de 2026....	154
Gráfico 13. Gráfico da frequência acumulada da produção mensal de gás de síntese (2015-2021).....	156
Gráfico 14. Estimativa de H ₂ , CH ₄ e CO teoricamente produzidos (2015-2021)	156
Gráfico 15. Acúmulo do hidrogênio teoricamente produzido	157
Gráfico 16. Acúmulo do metano teoricamente produzido.....	157
Gráfico 17. Acúmulo do monóxido de carbono teoricamente produzido	158
Gráfico 18 . Frequência acumulada da energia mensal teoricamente gerada.	159
Gráfico 19. Estimativa da quantidade de gás de síntese produzido a partir do processo de gaseificação	161
Gráfico 20. Frequência acumulada da quantidade de gás de síntese que pode ser produzido.....	161
Gráfico 21. Estimativa da produção de hidrogênio, metano e monóxido de carbono gerados até o ano de 2026.....	162
Gráfico 22. Estimativa de energia gerada (KW) até o ano de 2026	163
Gráfico 23. Produtos obtidos na pirólise dos resíduos poliméricos do ASCG (2015-2021)	164
Gráfico 24. Projeção dos produtos obtidos no processo de o de pirólise	165
Gráfico 25. Estimativa das quantidades anuais de materiais recicláveis encaminhados para o ASCG.....	166

Gráfico 26. Projeção dos materiais recicláveis dispostos no ASCG ate o ano de 2026	167
Gráfico 27. Estimativa da média mensal arrecadada, em reais, com a venda de materiais recicláveis (2015-2021).....	168
Gráfico 28. Estimativa da quantia arrecada com a comercialização dos materiais recicláveis.....	169

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ASPEN PLUS	Advanced System for Process Engineering Plus
ASCG	Aterro Sanitário de Campina Grande
ANOVA	Análise de variância unidirecional
CGE	Eficiência a frio de gaseificação
EOS	Euações de estado
FTIR	Transformada de Fourier
HDPE	Polietileno de alta densidade
HC	Conteúdo de Hidrocarboneto
INDC	Pretendida contribuição nacionalmente determinada
LDPE	Polietileno de baixa densidade
MCI	Motores de Combustão Interna
ONU	Organização das Nações Unidas
PR	Peng-Robinson
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PH	Potencial hidrogeniônico
PS	Poliestireno
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PET	Polietileno tereftalato
PB	Paraíba
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RE	Razão de Equivalência
RG	Razão de gaseificação
RGIBBS	Reator de equilíbrio
RYIELD	Reator de rendimentos
SBR	Razão vapor/biomassa
Syngas	Gás de síntese
WtE	Waste-to-Energy (WtE)
ASH	Cinzas
AS	Sobras de Alimentos
$(A_{a/c})_{real}$	Razão combustível/ar real
$(A_{a/c})_{estequiométrica}$	Razão estequiométrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

C	Carbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
EUA	Estados Unidos da América
F	Vazão mássica
H ₂	Gás Hidrogênio
H	Hidrogênio
H ₂ O	Água
N ₂	Gás nitrogênio
O ₂	Gás Oxigênio
O	Oxigênio
S	Enxofre

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	16
1.1. ANTECEDENTES GERAIS E JUSTIFICATIVA	16
1.2. OBJETIVOS	18
1.2.1. Objetivo Geral	18
1.2.2. Objetivos Específicos	18
1.2. REFERÊNCIAS	20
CAPÍTULO 2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1. MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL	21
2.2. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	25
2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	27
2.3.1. Geração de resíduos sólidos urbanos	28
2.3.2. Geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil	29
2.3.3. Disposição dos resíduos sólidos urbanos	30
2.3.4. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos	32
2.4. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: MATERIAIS POLÍMERICOS	33
2.4.1. Polímeros	33
2.4.2. Reciclagem dos polímeros	35
2.5. TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TÉRMICA	36
2.5.1. Pirólise	37
2.5.2. Gaseificação	44
2.7. GERAÇÃO DE POTÊNCIA	55
2.7.1. Motores De Combustão Interna (MCI)	55
2.8. CONCLUSÃO	58
2.9. REFERÊNCIAS	59
CAPÍTULO 3 ESTADO DA ARTE	67
3.1. CONCLUSÃO	75
3.2. REFERÊNCIAS	76
CAPÍTULO 4 SIMULAÇÃO: TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TÉRMICA PARA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RSU	78
4.1.2. Etapas da Simulação	81
4.2.1. Balanço de Massa	88
4.2.2. Composição do Produto: Fração Líquida	89
4.2.3. Composição do Produto: Gases não condensáveis	90
4.2.4. Fração Sólida	91

4.2.5. Propriedades do Óleo de Pirólise	91
4.2.6 Condições do Processo e Rendimento dos Produtos.....	92
4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
4.8 REFERÊNCIAS.....	95
CAPÍTULO 5 SIMULAÇÃO: GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS PARA OBTENÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE E GERAÇÃO DE ENERGIA	97
5.1. SELEÇÃO DO SIMULADOR.....	97
5.2. MODELAGEM DA PLANTA NO SOFTWARE ASPEN PLUS	98
5.2.1. Hipóteses	98
5.2.2 Etapas do Processo.....	100
5.2.3. Especificações Gerais	101
5.2.4. Seleção dos componentes.....	102
5.2.5. Seleção do pacote de fluidos	103
5.2.6. Definição das correntes	104
5.3 RESULTADOS E DISCURSÕES	112
5.3.1. Validação do modelo	113
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
5.5. REFERÊNCIAS.....	118
CAPÍTULO 6 PLANTA DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA.....	120
6.1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO	120
6.2. ETAPAS DO PROCESSO	122
6.2.1. Resfriamento Do Gás	122
6.2.2. Mistura ar/combustível.....	122
6.2.3. Compressão	123
6.2.4. Combustão	123
6.2.5. Expansão	123
6.2.6. Cálculo do trabalho útil	123
6.3. RESULTADOS.....	124
6.4 CONCLUSÃO	124
6.5. REFERÊNCIAS.....	125
CAPÍTULO 7 ESTUDO DE CASO DA GASEIFICAÇÃO APLICADA AOS RSU DO ASCG	126
7.1. CARACTERIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	126
7.2 METODOLOGIA	128
7.2.1 Seleção da localidade.....	130
7.2.2 Coleta de dados.....	130

7.2.3 Análise dos RSU dispostos no ASCG.....	130
7.2.4 Tecnologias de conversão térmica aplicadas aos resíduos poliméricos..	133
7.3 MATERIAIS RECICLÁVEIS	139
7.3.1 Projeção dos materiais recicláveis.....	139
7.3.2 Potência econômico associado aos materiais recicláveis.....	140
7.3 RESULTADOS.....	141
7.3.1 Escolha da localidade	141
7.3.2 Coleta de dados.....	142
7.3.3 Análise dos RSU dispostos no ASCG.....	146
7.3.4 Tecnologias de conversão térmica aplicadas aos resíduos poliméricos..	154
7.4 MATERIAIS RECICLÁVEIS	165
7.4.1 Projeção dos materiais recicláveis.....	167
7.4.2 Potencial econômico associado aos materiais recicláveis.....	167
7.5 CONCLUSÕES.....	170
7.6. REFERÊNCIAS.....	173
CAPÍTULO 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	175

AGRADECIMENTOS

Durante o período dos quatro anos que passei neste doutorado agradeço grandemente a todos que passaram por mim e que deixaram um pouco de si. Os momentos felizes que passei me fizeram acreditar na beleza da vida, e os momentos de sofrimento e solidão me proporcionaram um crescimento pessoal de aprendizado e experiência. É difícil transcrever sentimentos, porém serei eternamente grata a todos vocês pessoas imprescindíveis para a realização e conclusão deste trabalho.

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu o dom da vida, a coragem e determinação pela busca da sabedoria dos homens, o conhecimento.

Agradeço ao professor Dr. José Nilton Silva, por acreditar em minha capacidade e pela orientação. Agradeço a banca examinadora pela disponibilidade, tempo e ajuda na construção e aprimoramento deste trabalho.

Toda minha gratidão aqueles que sempre estiveram ao meu lado, minha família que é meu apoio e alicerce. Meu noivo Bonnierk Nathson Diniz, que sempre esteve ao meu lado me apoiando, acalmando e principalmente incentivando. A minha mãe Iranilza Cardoso Marinho dos Santos, que me apresentou a vida acadêmica e desde meus quatro anos tem me mostrado a importância da busca pelo conhecimento e do crescimento acadêmico e profissional. Minha mãe Mila, minha irmã, Janyelli, meu irmão Joalysson e meu pai José da penha pelo apoio e esforço de estar sempre ao meu lado.

Agradeço a meus amigos, tão poucos e tão preciosos, nem preciso citar os nomes aqui pois eles sabem que escrevi este parágrafo especialmente para eles, os tenho em meu coração e agradeço o incentivo, os consolos e as horas de alegria que me proporcionaram.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química e todos do departamento de Engenharia Química que nunca mediram esforços para ajudar e incentivar sempre nesta caminhada.

OBRIGADA!

RESUMO

Os materiais poliméricos apresentam uma elevada porcentagem na composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Estima-se que até 2015 foram gerados cerca de 6300 milhões de toneladas de resíduos poliméricos, desta quantidade 79% ficou acumulada em aterros ou ao ar livre. Todo esse material poderia ser convertido em produto de alto valor agregado a partir das tecnologias de conversão térmica. Nessa perspectiva, a presente pesquisa concentra-se no desenvolvimento de dois modelos de tecnologias de conversão térmica aplicadas aos materiais poliméricos, a pirólise e gaseificação, os quais permitam avaliar os processos em diferentes condições de operação, assim como o produto final obtido. Equitativamente objetiva-se, a partir de um estudo de caso com base nos dados históricos do aterro sanitário de Campina Grande (ASCG), constatar o desperdício consequente da simples disposição dos resíduos poliméricos e ausência de tecnologias como as propostas na presente pesquisa. A fim de cumprir com os objetivos do estudo, os processos de pirólise e gaseificação foram modelados no Aspen Hysys e Aspen Plus, respectivamente. Posteriormente, com base nos processos modelados e dados referentes aos RSU dispostos no ASCG foi realizado o estudo de caso dos referidos processos aplicados aos resíduos poliméricos dispostos no ASCG. Considerando a similaridade dos resultados obtidos nos processos modelados e dados experimentais extraídos da literatura constata-se que os modelos são verossímeis e permitem avaliar de forma quantitativa e qualitativa a conversão dos materiais poliméricos. Ambos os processos possibilitam a conversão dos polímeros em produtos de alto valor agregado, entretanto, o principal produto da pirólise, o óleo de pirólise, apesar de apresentar características que possibilitam seu uso como combustível alternativo ainda necessita de otimização e pesquisas que possibilitem tal aplicação, por outro lado, o gás de síntese, produto obtido no processo de gaseificação, possibilita várias rotas químicas o que o torna mais viável no que se refere a aplicação do produto final. Um modelo de motor de combustão interna ciclo Otto integrado ao processo de gaseificação permitiu observar o trabalho líquido oferecido pelo gás de síntese, o qual permite, a partir de 113 kg/hr de polímeros, a obtenção de 72,96 kW. O estudo de caso realizado no ASCG permitiu observar a grande quantidade de resíduos de polímeros acumulados no ASCG e o desperdício referente a simples disposição dos mesmos. Estima-se que de agosto de 2015 a agosto de 2021, 123.751,3 toneladas de polímeros foram destinadas ao ASCG, tal quantidade poderia, a partir do processo de gaseificação ser convertida em 211.479,1247 toneladas de gás de síntese, e a partir dessa quantidade seria possível obter 10.877,26 toneladas de hidrogênio, 35.299,67 toneladas de CH₄ e 31.473,59 toneladas de CO, além de possibilitar a produção de 109.450,7 KW. Estima-se que a implementação do processo de gaseificação no ASCG possibilitaria obter, de 2023 a 2026, 178.905,5 toneladas de gás de síntese e gerar 92.592,3 KW. Em termos gerais pode-se concluir que os modelos de tecnologia de conversão térmica propostos na presente pesquisa oferecem uma alternativa para análise dos processos de pirólise e gaseificação aplicados a conversão de materiais poliméricos e que o processo de gaseificação pode ser proposto como uma alternativa viável dentro do plano de gestão de resíduos sólidos urbanos do ASCG e de grandes centros urbanos com situação similar.

Palavras-chave: Pirólise; gaseificação; Aspen Plus; Ciclo Otto.

ABSTRACT

Polymeric materials have a high percentage in the composition of urban solid waste (MSW). It is estimated that by 2015 around 6300 million tons of polymeric waste were generated, of which 79% was accumulated in landfills or outdoors. All this material could be converted into a high value-added product using thermal conversion technologies. From this perspective, the present research focuses on the development of two models of thermal conversion technologies applied to polymeric materials, pyrolysis and gasification, which allow the evaluation of processes under different operating conditions, as well as the final product obtained. The objective is equally, from a case study based on historical data from the Campina Grande landfill (ASCG), to verify the waste resulting from the simple disposal of polymeric waste and the absence of technologies such as those proposed in this research. In order to fulfill the objectives of the study, the pyrolysis and gasification processes were modeled in Aspen Hysys and Aspen Plus, respectively. Subsequently, based on the modeled processes and data referring to the MSW disposed in the ASCG, a case study of the referred processes applied to the polymeric waste disposed in the ASCG was carried out. Considering the similarity of the results obtained in the modeled processes and experimental data extracted from the literature, it appears that the models are credible and allow the quantitative and qualitative evaluation of the conversion of polymeric materials. Both processes allow the conversion of polymers into high value-added products, however, the main product of pyrolysis, the pyrolysis oil, despite having characteristics that allow its use as an alternative fuel, still needs optimization and research that allow such application, on the other hand, the synthesis gas, a product obtained in the gasification process, allows several chemical routes, which makes it more viable with regard to the application of the final product. A model of an Otto cycle internal combustion engine integrated to the gasification process allowed to observe the net work offered by the synthesis gas, which allows, from 113 kg/hr of polymers, to obtain 72.96 kW. The case study carried out at the ASCG allowed us to observe the large amount of polymer residues accumulated in the ASCG and the waste related to their simple disposal. It is estimated that from August 2015 to August 2021, 123,751.3 tons of polymers were destined for the ASCG, such amount could, from the gasification process, be converted into 211,479.1247 tons of synthesis gas, and from that amount, it would be possible to obtain 10,877.26 tons of hydrogen, 35,299.67 tons of CH₄ and 31,473.59 tons of CO, in addition to enabling the production of 109,450.7 KW. It is estimated that the implementation of the gasification process at the ASCG would make it possible to obtain, from 2023 to 2026, 178,905.5 tons of synthesis gas and generate 92,592.3 KW. In general terms, it can be concluded that the thermal conversion technology models proposed in the present research offer an alternative for the analysis of pyrolysis and gasification processes applied to the conversion of polymeric materials and that the gasification process can be proposed as a viable alternative within of the urban solid waste management plan of the ASCG and of large urban centers with a similar situation.

Keywords: Pyrolysis; gasification; Aspen Plus; Otto cycle.

CAPÍTULO 1 | INTRODUÇÃO

1.1. ANTECEDENTES GERAIS E JUSTIFICATIVA

A produção de resíduos sólidos é intrínseca a condição humana, sua sobrevivência e seu desenvolvimento, ou seja, durante todo o ciclo de vida da humanidade o ser humano gerou resíduos, entretanto, antigamente, a quantidade de resíduos, por ser relativamente pequena, era naturalmente extinta pela natureza, existindo dessa forma, um equilíbrio.

Dias (2002) ressalta que o processo de urbanização desencadeado pela revolução industrial, em 1779, modificou significativamente a vida da sociedade, visto que, o processo de industrialização trouxe uma nova realidade, como implementação de fábricas, empresas e aumento na produtividade. Além da revolução industrial, vários fatores contribuíram para o incremento na produção de resíduos com o passar dos anos, dentre eles, o crescimento populacional, o processo de urbanização, desenvolvimento tecnológico e a atual cultura do consumismo, que contribui ainda com o consumo exagerado de produtos descartáveis e com a disposição inadequada dos resíduos sólidos.

A sociedade atual é induzida ao consumo, o sociólogo Bauman (2008) ao citar que “na sociedade de consumidores ninguém pode se tornar sujeito sem primeiro virar mercadoria” traduz bem a cultura do consumismo contemporânea ao apresentá-la como principal figura das relações sociais. Nesse sentido, constantemente novos produtos são criados, tornando os anteriores obsoletos e estimulando o consumo desenfreado de uma sociedade projetada à obsolescência programada e como resultado observa-se uma grande produção de resíduos.

Vale salientar que os fatores anteriormente mencionados contribuem igualmente para o aumento da demanda de energia em todos os setores. Ressalta-se ainda que este incremento energético é uma tendência, fato preocupante considerando a forte dependência da matriz energética mundial dos combustíveis fósseis, os quais contribuem com o aquecimento global além de, apresentarem custos cada vez mais altos e ainda serem fontes de energia não renováveis, sendo dessa forma, relativamente escassos.

Diante do exposto e considerando o grande potencial energético presente nos resíduos sólidos urbanos, além do fato de que, segundo o pai da química moderna,

“na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma, o meio acadêmico vem realizando pesquisas referentes a destinação adequada dos resíduos sólidos, a qual, deve compreender reciclagem, recuperação e aproveitamento dos resíduos, além de não oferecer riscos à saúde pública e impactos ambientais.

Um dos principais focos no que se refere a reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são as tecnologias de conversão térmica, dado que, as mesmas se apresentam eficientes e ambientalmente corretas.

Vale destacar a heterogeneidade dos RSU os quais são compostos por materiais recicláveis e não recicláveis. Os materiais poliméricos, de acordo com Costa (2006) apresentam uma elevada porcentagem na composição dos RSU, a qual tende a aumentar cada vez mais devido suas características e alto consumo de descartáveis que são normalmente constituídos de materiais plásticos.

Associado aos RSU, em particular aos resíduos poliméricos existentes no mesmo, existe um grande potencial energético, o qual pode ser mensurado segundo o poder calorífico inferior (PCI) que quantifica a quantidade de energia contida no composto. Os polímeros apresentam PCI elevado que se assemelham ao de combustíveis convencionais como o da gasolina e do petróleo.

O potencial presente nos resíduos poliméricos pode ser recuperado a partir de processos bioquímicos ou termoquímicos. Mavrotas (2013) menciona que atualmente os processos termoquímicos tornaram-se significativos para gestão e reciclagem dos resíduos sólidos urbanos. Em relação aos processos termoquímicos aplicados a conversão dos RSU, Belgiorno et al. (2002) elenca os mais importantes: o processo de pirólise, gaseificação e incineração (combustão).

Entre os processos supramencionados destacam-se os processos de pirólise e gaseificação. Couto et al (2017) e Sikarwar et al (2017) ressalta que a gaseificação é um processo viável e permite uma solução para a destinação e aproveitamento dos resíduos, além de ser uma solução alternativa no que se refere aos problemas energéticos, visto que, os referidos processos conseguem converter resíduos em energia.

No meio acadêmico diversos trabalhos têm sido publicados no que se refere ao tratamento e recuperação de resíduos poliméricos a partir dos processos de pirólise e gaseificação. Muitas pesquisas estudam as condições do processo com a intenção de otimizá-las, analisam as características do produto obtido no referido processo ou ainda estudam seu potencial energético.

A presente pesquisa visa o desenvolvimento de um modelo dos processos de pirólise e gaseificação, os quais permitam analisar os processos em diferentes condições de operação, além de predizer seus produtos finais. Ademais, objetiva-se realizar, a partir dos modelos desenvolvidos, uma análise comparativa dos processos de pirólise e gaseificação, a fim de verificar a eficiência dos mesmos na conversão de resíduos poliméricos em produtos de alto valor agregado e verificar o modelo de tecnologia de conversão térmica mais viável e eficiente.

Equiparado aos objetivos supramencionados, pretende-se ainda observar a significância das tecnologias de conversão térmica no tratamento de resíduos poliméricos a partir de um estudo de caso com base nos RSU dispostos no Aterro Sanitário de Campina Grande (ASCG).

Diante dos fatos expostos e dos objetivos do presente estudo é possível afirmar que esta pesquisa contribui para a resolução de problemas ambientais, assim como na propositura de fontes alternativas de energia, que além de renováveis apresentam baixo custo, possibilitando solucionar desafios relacionados a: disposição final dos resíduos sólidos, ocupação dos aterros sanitários, escassez e alto custo dos combustíveis fósseis, emissão dos gases do efeito estufa, saúde pública, incentivo aos avanços das tecnologias de conversão térmica e crise energética.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Desenvolver modelos de tecnologias de conversão térmica que possibilitem uma análise quantitativa e qualitativa da conversão de polímeros em produtos de alto valor agregado, além de analisar qual dos modelos é mais eficiente no que se refere a aplicação do produto final.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar a modelagem dos processos de pirólise e gaseificação da fração polimérica dos RSU;

- Desenvolver a modelagem de uma planta de geração de potência integrada ao sistema de gaseificação com a finalidade de determinar o trabalho útil do gás de síntese;
- Realizar um estudo de caso no que se refere as tecnologias de conversão térmica para o tratamento de resíduos poliméricos com base nos resíduos sólidos urbanos dispostos no Aterro Sanitário de Campina Grande.
- Realizar uma análise comparativa, a partir dos processos modelados, entre as tecnologias de conversão térmica de modo a identificar a mais viável no que se refere ao tratamento da fração polimérica dos RSU, o produto final obtido e sua aplicação.

1.2. REFERÊNCIAS

BAUMAN, Zygmunt. *Vida para Consumo: a transformação das pessoas em mercadoria*. Rio de Janeiro: Editora Zahar, 2008.

BELGIORNO, V, DE FEO G, DELLA ROCCA C, NAPOLI RM. **Energy from gasification of solid wastes**. *Waste Management*, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2003. Acesso em 11 Nov. 2021. Disponível em <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12623097/#:~:text=Gasification%20technology%20is%20by%20no,thermal%20treatment%20of%20solid%20waste.> >

COUTO, N., SILVA, V., MONTEIRO, E., & ROUBOA, A. **Exergy analysis of portuguese municipal solid waste treatment via steam gasification**. *Energy Conversion and Management*, 2017. v. 134, p. 235–246. Acesso em 11 Dez. 2020. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689041631127X> >

COSTA, P. A. da C. **Produção de hidrocarboneto líquidos e gasosos por pirólise de resíduos plásticos**. *Tese (Doutorado em engenharia química)*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de ciências e tecnologia, Lisboa, 2006. Acesso em 20 Nov. 2021. <Disponível em <https://docero.com.br/doc/s5588xs>>

DIAS, G. F. *Pegada ecológica e sustentabilidade humana*. São Paulo: Editora Gaia, 2002. 257 p.

MAVROTAS, G; SKOULAXINO, S; GAKIS, N; KATSOUROS, V; GEORGOPOULOU, E. **“A multiobjective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management.”** *Waste management (New York, N.Y.)*, vol. 33, no. 9, pp. 1934–49, Sep. 2013. Acesso em 12 Nov. 2020. Disponível em <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23751513/> >

SIKARWAR, V. S., ZHAO, M., FENNELL, P. S., SHAH, N., & ANTHONY, E. J. **Progress in biofuel production from gasification**. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017. v. 61, p. 189–248. Acesso em 11 Nov. 2021. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036012851630106X> >

CAPÍTULO 2 | REVISÃO DE LITERATURA

O presente capítulo apresenta uma revisão de literatura no que se refere ao tema geral da pesquisa. Nele apresentam-se conceitos importantes que oferecem suporte para compreensão do trabalho desenvolvido assim como sua importância. O capítulo foi dividido em sete tópicos, sendo eles: Matriz energética mundial, matriz energética brasileira, Resíduos Sólidos Urbanos, disposição dos resíduos sólidos urbanos, resíduos sólidos urbanos: materiais poliméricos, tecnologias de conversão térmica, geração de potência.

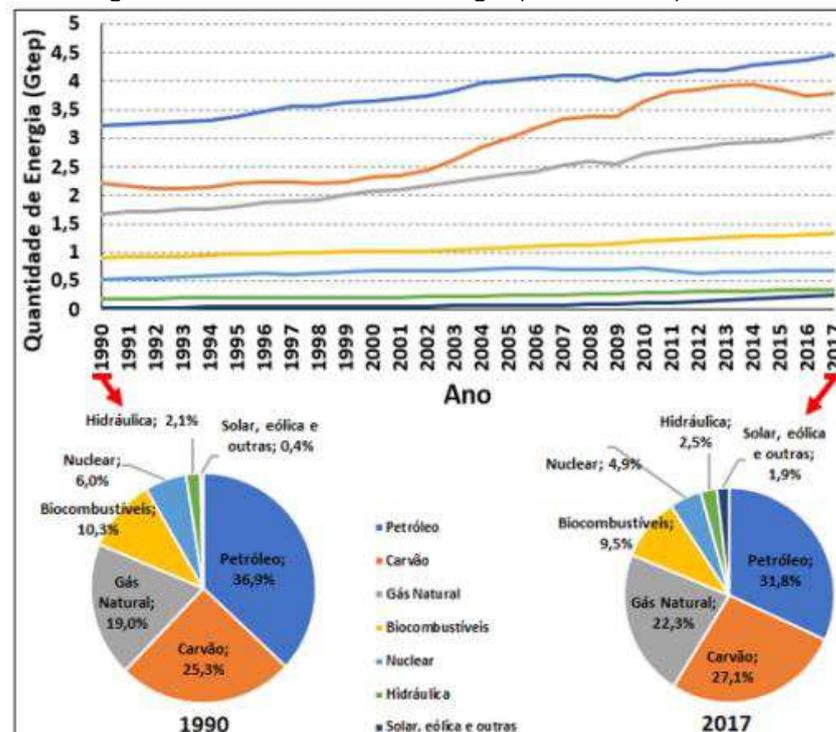
2.1. MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

O grande desenvolvimento tecnológico e industrial traz consigo uma alta demanda no consumo de energia que envolve todos os setores o que ocasiona uma forte dependência da sociedade moderna no tocante a energia, e conseqüentemente, leva a escassez crescente dos recursos. Diante desse contexto, discussões e estudos a respeito da sustentabilidade e energia renováveis entram cada vez mais em foco, entretanto, a busca e prática por soluções sustentáveis só se torna possível diante da compreensão da matriz energética.

A matriz energética mundial refere-se a toda energia gerada mundialmente, ou seja, a obtida a partir do petróleo, carvão mineral, gás natural, biomassa, nuclear, hidráulica e outras categorias como a energia solar, geotérmica entre outras. Na Figura 1 é possível observar a oferta mundial de energia entre os anos de 1990 a 2017.

Analisando a Figura 1 observa-se que 86,1% da energia mundial é proveniente dos combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão e nuclear), tal fato evidencia a dependência mundial dos combustíveis fósseis. A predominância dos combustíveis fósseis como principal fonte de energia nos países é histórica, o que tem gerado graves problemas ambientais e colocado em risco as reservas e a sustentabilidade mundial em um futuro próximo (NASCIMENTO; MENDONÇA; CUNHA, 2012).

Figura 1. Oferta Mundial de energia (1990 a 2017)



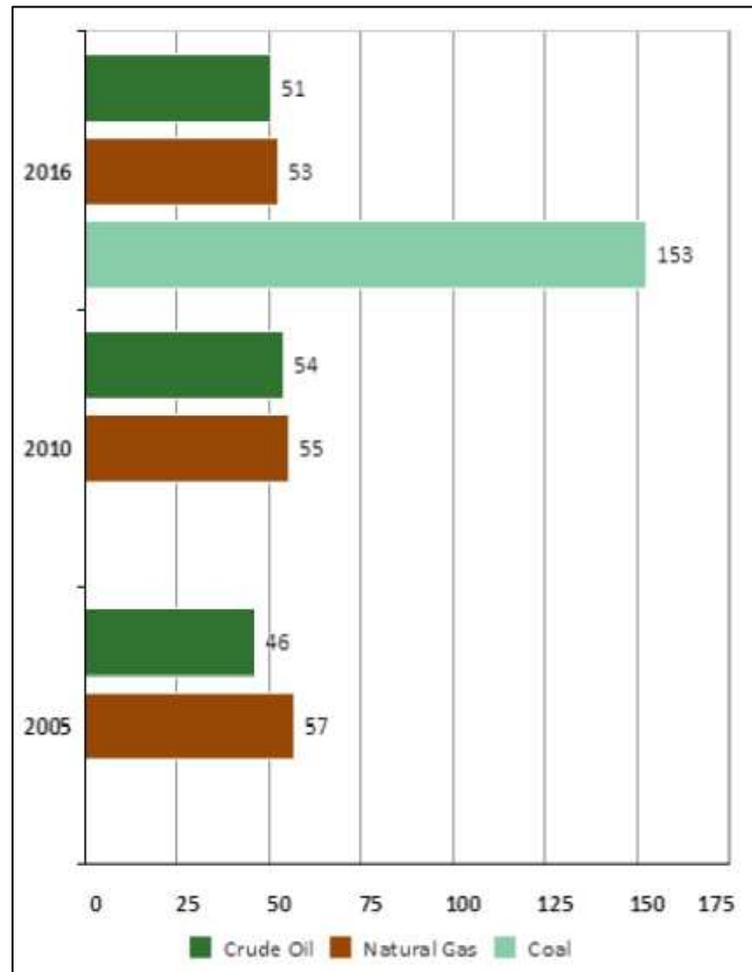
Fonte: SANTOS, RODRIGUES E CARNIELLO (2021) Apud IEA (2020)

A forte dependência dos combustíveis fósseis é preocupante devido ao fato dos mesmos serem fontes de energia não renováveis, dessa forma, eles são relativamente escassos, existindo o risco de seu esgotamento, como é possível observar no gráfico presente na Figura 2 o qual apresenta uma estimativa em anos das reservas restantes de combustíveis fósseis.

Ao observar a Figura 2 pode-se verificar que as reservas de combustíveis fósseis conseguem suprir apenas algumas gerações, dessa forma, caso as futuras gerações continuem com uma matriz energética tal qual a atual (fortemente dependente dos combustíveis fósseis) a humanidade enfrentará sérios problemas.

Outro ponto importante em relação aos combustíveis fósseis é a questão ambiental. Eles estão associados à emissão de gases do efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO_2) considerado o pior vilão da atmosfera, desta forma, contribuem com o aquecimento global e intensificação do efeito estufa ocasionando uma série de consequências.

Figura 2. combustíveis fósseis: estimativa em anos das reservas restantes



Fonte: PATROCÍNIO (2017)

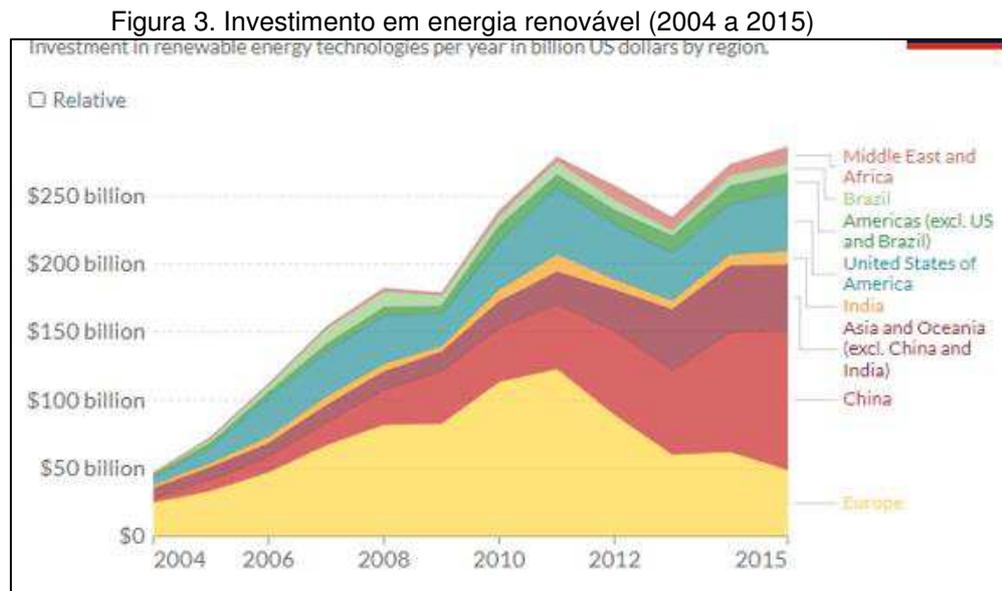
Considerando a realidade da matriz energética mundial, a forte dependência dos combustíveis fósseis e a tentativa do desenvolvimento sustentável, os países têm buscado modificar tal realidade. Acordos para diminuição da emissão dos gases do efeito estufa vem surgindo, dentre eles pode-se citar o protocolo de Kyoto, criado em 1997 que tem a pretensão de minimizar a emissão de gases, diminuindo assim o efeito estufa.

Outro acordo – mais recente – com a mesma vertente do protocolo de Kyoto é o acordo de Paris que tem o objetivo de comprometer os países na redução e emissão de gás carbônico e metano para atmosfera. Além disto, existem ainda os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável elaborados pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Dentre os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU, o sétimo prevê que além do investimento em infraestrutura e tecnologias de energia limpa, os

serviços de energia, até 2030, sejam oferecidos universalmente, de forma moderna, confiável e a acessível (CARMONA; KASSAI, 2019).

Nessa perspectiva, investimentos mundiais em fontes de energia renováveis intensificaram-se, como é possível observar no o gráfico da Figura 3 que apresenta o impulsionamento no investimento mundial em energia limpa entre os anos de 2004 a 2015.



Fonte: OUR WORD IN DATA (2017)

Além dos fatores supramencionados é importante destacar a desigualdade existente nas reservas dos combustíveis fósseis entre os países, dessa forma países com menor quantidade de reservas tornam-se dependentes dos que detém maiores reservas.

Dado que a energia fóssil – ao contrário da biológica- se encontra acumulada em depósitos geológicos, i.e, em locais muito específicos do planeta, emergem relações de dependência e domínio energético entre os países: os países sem reservas energéticas significativas – países com reservas de exploração economicamente viável, ou sem capacidade de satisfazer a procura energética interna total – encontram-se, parcial ou totalmente, dependentes dos que possuem essas mesmas reservas, devido à necessidade de energia que o desenvolvimento socioeconômico requer. Assim, revela-se pertinente abordar a problemática do grau de (in)segurança, relativo ao fornecimento de energia, a que os países estão (SAIOTE, 2012. pág 2).

Diante do exposto é notória a necessidade de fontes alternativas de energia que permitam o uso da energia limpa e maior independência dos combustíveis fósseis. Nesse contexto, os países que investem e posicionam-se no que se refere a tais questões apresentam vantagens sustentáveis e corporativas.

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Até meados dos anos 40 a matriz energética brasileira tinha como principal fonte a lenha e o carvão vegetal, entretanto, durante o processo de industrialização o país realizou grandes investimentos no setor automobilístico, sendo assim, diante de uma crescente demanda e busca por petróleo, intensificaram-se as pesquisas em relação aos combustíveis fósseis. O pico do petróleo ocorreu no ano de 1970, neste período cerca de 45% da energia gerada no país era do petróleo (CARMONA; KASSAI, 2019).

Durante o século XX o Brasil passou por um intenso processo de industrialização, o que ocasionou um expressivo desenvolvimento econômico, e aumento da demanda do consumo de energia primária (TOLMASQUIM; GUERREIOR; GORINI, 2007). Vale salientar a relação direta da economia de um país com a sua matriz energética.

Ao observar a matriz energética brasileira (Figura 4) é possível constatar sua diversidade. Percebe-se também que, assim como a matriz energética mundial, ela tem como principal fonte de energia os combustíveis fósseis, entretanto, quando comparada a matriz energética mundial, a média nacional destaca-se em relação a matriz energética mundial, visto que, a matriz energética brasileira apresenta uma porcentagem significativa (46,1%) em relação às fontes de energias renováveis, ficando acima da média mundial.

Figura 4. Investimento em energia renovável (2004 a 2015)



Fonte: BEN (2020)

De acordo com a Resenha energética brasileira (REB, 2021), no ano de 2020 todo cenário mundial foi afetado por uma crise sanitária incluindo a demanda e

consumo de energia. No Brasil devido a maior atividade residencial houve um aumento de 4,1% do consumo de energia elétrica e 3,7% do consumo de gás de cozinha, além disto, com a maior contribuição dos transportes aéreos e veículos leves e de geração de eletricidade os combustíveis fósseis foram severamente afetados pela crise sanitária devido ao COVID-19. Por outro lado, as fontes de energia renováveis não foram afetadas de forma significativa.

No ano de 2020, mesmo que as fontes não renováveis de energia permaneçam predominantes, existiu um aumento na utilização das fontes renováveis, é o que se pode observar na Tabela 1.

Tabela 1. Oferta interna de energia

Especificação	2019	2020	2019	2020
Não renovável	158.316	148.518	53,91	51,6
Petróleo e derivados	100.898	95.245	34,3	33,1
Gás Natural	35.909	33.824	12,2	11,8
Carvão mineral e derivados	15.435	14.027	5,3	4,9
Urânio e derivados	4.292	3.727	1,5	1,3
Outras não renováveis	1.780	1.693	0,6	0,6
Renovável	135.642	139.094	46,1	48,4
Hidráulica e eletricidade	36.364	36.210	12,4	12,6
Lenha e carvão vegetal	25.725	25.710	8,8	8,9
Derivados da cana de açúcar	52.841	54.933	18	19,1
Outras renováveis	20.712	22.241	7	7,7
TOTAL	293.957	287.612	100	100

Fonte: REB (2021)

Frente ao acordo de Paris, que tem a finalidade de reduzir os gases do efeito estufa, o Brasil assumiu tal compromisso e está entre os países que elaboraram a “pretendida contribuição nacionalmente determinada” (INDC), um documento com as medidas e esforços adotados pelo país afim de minimizar a emissão dos gases do efeito estufa.

O governo brasileiro propôs no documento da pretendida “Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima” a adoção de uma meta de redução absoluta de emissões aplicável ao conjunto da economia, tendo 2005 como ano de referência: até 2025 a redução seria de 37%; para 2030 foi indicada uma contribuição nas reduções de emissões de 43%. A métrica proposta para a INDC brasileira foi o Global Warming Potential, elaborada para o período de 100 anos (GWP-100), usando os valores do 5º Relatório de Avaliação do IPCC (AR-5) (CARMONA; KASSAI, 2019, pág. 8).

No documento consta ainda iniciativas a serem tomadas no tocante aos setores que tem maior participação na emissão dos gases do efeito estufa. No que se refere ao setor energético as ações de acordo com CARMONA e KASSAI (2019) são:

1. O aumento do consumo de biocombustíveis sustentáveis na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030, aumentando a oferta de etanol, inclusive por meio do aumento da parcela de biocombustíveis avançados (segunda geração), e aumentando a parcela de biodiesel na mistura do diesel;
2. No setor da energia, alcançar participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética até 2030, incluindo:
 - expandir o uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, na matriz total de energia para uma participação de 28% a 33% até 2030;
 - expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23% até 2030, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar;
 - alcançar 10% de ganhos de eficiência no setor elétrico até 2030.

As iniciativas são grandes desafios nacionais, entretanto, apresentam grande relevância visto que, devido aos fatores já mencionados, existe um interesse mundial na intensificação de ações, pesquisas e recursos referentes a fontes de energia limpa e renováveis.

2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Resíduos sólidos, conforme a Norma 10004 (ABNT, 1987) são resíduos que se encontram no estado sólido e semissólido os quais resultam das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição.

Consoante com sua definição observa-se a variedade dos resíduos classificados como resíduos sólidos, dentre eles encontram-se aqueles advindos das atividades que envolvem concentração humana em áreas urbanas, esses são denominados de resíduos sólidos urbanos (RSU) que compreendem os resíduos residenciais, comerciais, industriais, resíduos dos estabelecimentos de saúde, construção civil, agrícola e de limpeza pública.

O Plano nacional de resíduos sólidos urbanos (PNRS, 2012) define RSU como qualquer material, objeto, substância ou bem que foi descartado e é oriundo de atividades que o ser humano pratique em sociedade o qual a destinação final encontre-se no estado sólido ou semissólido (assim como gases contidos em recipientes líquidos) tornando inviável sua disposição em rede pública de esgotos e corpos d'água ou que necessitem de soluções técnicas ou inviáveis economicamente diante da melhor tecnologia disponível para sua destinação.

A definição supramencionada deixa claro que, um dos fatores que também deve ser considerado na destinação e disposição final dos resíduos sólidos urbanos é que o processo deve também ser viável economicamente.

Em suma, RSU referem-se basicamente a materiais sólidos descartados em áreas urbanas, em sua maioria provenientes da atividade doméstica podendo conter também materiais descartados de outras atividades humanas. A produção de tais resíduos vem crescendo exponencialmente de forma significativa em decorrência do crescimento populacional associado à globalização, estilo de vida e consumismo.

2.3.1. Geração de resíduos sólidos urbanos

Segundo Hoornweg e Bhada (2012) do ano de 2002 a 2012 ocorreu um aumento mundial dos resíduos sólidos urbanos de 680 para 1.300 milhões de toneladas por ano. O principal fator ligado ao aumento exponencial dos resíduos sólidos é o crescimento populacional. Godecke et al. (2012) destaca que a geração de RSU excedeu sete bilhões em um crescimento populacional de dois bilhões em 25 anos. De acordo com FAO (2014) estima-se que, até 2050, a população mundial pode chegar a 9,6 bilhões de pessoas, o que possivelmente levará a uma geração muito maior de resíduos sólidos.

Outro aspecto importante relacionado a produção dos resíduos sólidos urbanos é o consumismo, que não está relacionado apenas ao fator econômico, mas também aos hábitos da populacionais.

É ilustrativa a comparação da cultura americana e japonesa: enquanto os primeiros geram cerca de dois quilogramas de resíduos sólidos urbanos (RSU) por habitante ao dia, os japoneses, também de elevado poder aquisitivo, apresentam comportamentos que resultam numa geração significativamente menor, pouco superior a um quilograma (GODECKE et al., 2012, pág 1701).

Ansah (2013) pontua que segundo a Agência de Proteção Ambiental dos EUA, ocorreu um aumento de 65% na geração anual de resíduos sólidos urbanos desde o ano de 1980 e a tendência é que essa geração continue a aumentar nas décadas seguintes.

2.3.2. Geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil

No Brasil, de acordo com dados do panorama dos resíduos sólidos no Brasil (2017) a geração de RSU no ano de 2017 foi de 78,4 milhões de toneladas, o que, em comparação ao ano de 2016 representa um aumento de 1%. no gráfico da Figura 5 pode-se observar a geração de RSU em toneladas por dia nos anos de 2016 e 2017 assim como a geração de RSU per capita.

Figura 5. Geração de RSU no Brasil (2016-2017)



Fonte: PANORAMA GERAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO BRASIL (2017)

Observa-se um aumento de 0,48% na geração per capita entre os anos de 2016 e 2017 e, nesse mesmo período um aumento de 1% na produção por dia de RSU, que de acordo com o panorama de resíduos sólidos no Brasil do ano de 2017, esses dados representam um total de 214.868 toneladas por dia de RSU no Brasil. Pode-se ainda

comparar a produção de RSU no ano de 2017 e 2018 a partir dos dados presentes no gráfico da Figura 6.



Fonte: PANORAMA GERAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO BRASIL (2017)

Verifica-se um aumento tanto no tocante a geração de resíduos sólido urbanos por dia quanto a geração per capita. A geração diária teve um aumento de quase 1%, tal aumento, segundo o panorama de resíduos sólidos no Brasil de 2018/2019, é referente a uma geração de 216.629 toneladas diárias. No que se refere a geração per capita, que teve um aumento de 0,39%, os dados indicam a geração de mais de 1 kg de RSU por dia.

Os dados supracitados evidenciam o crescimento da geração de resíduos sólidos Urbanos no Brasil. O Panorama dos resíduos sólidos no Brasil do ano de 2020 cita que em um período de 9 anos (2010-2019) o Brasil apresentou um aumento de 12,4 milhões de toneladas na geração de resíduo sólidos urbanos.

Pode-se concluir, conforme os dados expostos em relação à produção de RSU no Brasil que o cenário brasileiro segue a mesma linha do cenário mundial apresentando um aumento na produção dos mesmos. Entretanto, a maior preocupação no tocante ao crescimento exponencial da geração de RSU deposita-se na disposição do mesmo, pois, uma grande massa de RSU requer um plano estratégico de tratamento e disposição.

2.3.3. Disposição dos resíduos sólidos urbanos

Durante todo o ciclo de vida da humanidade ocorreu e ainda ocorre a produção de resíduos, os quais, serviam de alimentos para outras espécies ou eram eliminados

naturalmente pela natureza, entretanto o crescente e contínuo aumento de sua produção provocou um desequilíbrio e um acúmulo dos mesmos na natureza e esse acúmulo é um fator preocupante dado que ele vem acompanhado de sérios problemas ambientais além de afetar a saúde pública.

Todos os fatores já mencionados e que fomentam o crescimento dos RSU tornam cada vez mais complexa sua destinação e disposição final. Conforme o artigo terceiro da política nacional de resíduos sólidos a destinação final e ambientalmente adequada dos RSU compreende uma destinação que inclua a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou ainda outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do sistema nacional do meio ambiente, do sistema nacional de vigilância sanitária e do sistema unificado de atenção a sanidade agropecuária, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar riscos à saúde pública, a segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Desta forma, compreende-se que toda forma de reutilização, como compostagem, reciclagem, pirólise e até mesmo a própria disposição dos resíduos sólidos são categorias de destinação final, as quais necessitam ocorrer de maneira ambientalmente adequada de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e impactos ambientais negativos. Pode-se citar como exemplos de disposição final de resíduos sólidos urbanos ambientalmente adequados os aterros sanitários, os aterros de inertes e aterros industriais, desde que cumpram as normas e leis aplicáveis.

De acordo com Araújo (2016) as formas de disposição mais utilizadas no Brasil são os aterros controlados, aterros sanitários e lixões. A disposição em lixões a céu aberto é uma forma de disposição inviável tanto economicamente quanto ambientalmente, visto que consiste no simples lançamento dos resíduos sem nenhum tratamento ou critério normativo, o que pode causar danos ambientais e até mesmo a saúde pública.

Nos aterros controlados o resíduo é confinado por uma cobertura composta de material inerte, essa é a única diferença entre eles e os lixões, onde o resíduo fica disposto a céu aberto. Segundo Araújo (2016) essa técnica minimiza a presença de animais quando comparado aos lixões, entretanto, a contaminação do solo em consequência do chorume persiste dado que não há uma impermeabilização do solo.

Dentre as três principais disposições de resíduos sólidos utilizadas no Brasil o aterro sanitário é a mais adequada, posto que a mesma segue critérios normativos e

não agride a saúde pública, já a disposição em aterros controlados e a céu aberto, devido causar danos ambientais e a saúde pública, são formas de disposição inadequadas, segundo Araújo (2016) uma das diretrizes da política apresentada pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos é a eliminação dos lixões e aterros controlados.

Considerando a forma em que os RSU são dispostos no Brasil (aterros sanitários, aterros controlados e lixões), perde-se, um grande potencial energético oriundo dos mesmos. Dados revelam que apenas um percentual de 10% dos RSU brasileiros tem destinação final e são encaminhados para compostagem, triagem, reciclagem, incineração, vazadores em áreas alagadas e outros destinos, os 90% restantes encontram-se acumulados em aterros e lixões (AMBIENTE, 2012).

A redução de resíduos, assim como a decisão referente ao uso de tecnologia e destinação final é uma decisão que compete à gestão, assim, e necessita de uma análise minuciosa que envolve vários fatores como condições políticas, legais, financeiras, sociais, institucionais e ambientais.

2.3.4. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos

Os RSU constituem-se de uma mistura heterogênea que é composta de materiais de natureza distinta, sua composição está diretamente relacionada com a sociedade que a produz. A Tabela 2 apresenta a composição gravimétrica dos RSU em países distintos, o qual compõe-se de um percentual de cada componente.

Tabela 2. Composição Gravimétrica dos RSU em diversos países

Composto	Brasil	Alemanha	Holanda	EUA
Matéria orgânica	61	14	35	25
Vidro	3	12	4	5
Metal	2	6	4	8
Plástico	15	22	19	12
Papel	15	34	26	34

Fonte: NÁSNER (2015) Apud A GLOBAL REVIEW OF SOLID WASTE MANAGEMENT (2012)

A partir da Tabela 2 verifica-se que os RSU são compostos por materiais recicláveis e não recicláveis, desta forma é fundamental conhecer sua composição quando o objetivo é a reciclagem dos mesmos, saber sua constituição permitirá

conhecer seu potencial de comercialização e de conversão energética a partir do aproveitamento das frações recicláveis.

Pode-se observar o perfil dos RSU municipais brasileiros e sua constituição a partir da Tabela 3.

Tabela 3. Composição Gravimétrica dos RSUs no Brasil (base seca)

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material reciclável	31,9	58527,4
Metals	2,9	5293,5
Aço	2,3	4213,7
Alumínio	0,6	1079,9
Papel, Papelão e tetrapak	13,1	23997,4
Plástico total	13,5	24847,4
Plástico filme	8,9	16399,6
Plástico Rígido	4,6	8448,3
Vidro	2,4	4366,6
Matéria Orgânica	51,4	94335,1
Outros	16,7	30618,9
Total	100	183481,5

Fonte: ARAÚJO (2016)

Com o passar dos anos e devido as características dos polímeros observa-se um aumento dos resíduos sólidos poliméricos o que contribui diretamente para a grande e crescente produção dos RSU. Os resíduos poliméricos ou resíduos plásticos apresentam uma elevada porcentagem nos RSU, eles são maior fonte de resíduos de materiais poliméricos (COSTA, 2006). Assim, diante da grande massa de polímeros presentes nos RSU e ainda, de seu grande e significativo potencial energético, o estudo referente aos resíduos poliméricos de forma isolada é de suma importância.

2.4. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: MATERIAIS POLÍMERICOS

2.4.1. Polímeros

O termo Polímero de origem grega, poli (muitos) e mero (unidade de repetição), significa muitas partes. Pode-se definir polímeros como um material constituído por uma estrutura molecular que apresenta unidades relativamente simples que se repetem e formam ligações covalentes do tipo sp^3 entre si. (SILVA; SILVA, 2003).

A matéria-prima dos polímeros é em sua maioria o petróleo (monômeros) entretanto, os mesmos podem ser obtidos através de recursos naturais renováveis, como a cana-de-açúcar (JÚNIOR, 2017).

O petróleo, composto basicamente por compostos orgânicos possibilita, a partir do processo de destilação fracionada, a obtenção de vários produtos: o gás liquefeito, a nafta, a gasolina, o gasóleo, as graxas parafínicas, os óleos lubrificantes e o piche. Os monômeros são obtidos a partir da nafta, que por sua vez, submetida a um processo de craqueamento térmico (aquecimento na presença de catalisadores), origina várias substâncias como por exemplo o etileno, o propileno, o butadieno, o buteno, o isobutileno, os quais são denominados de petroquímicos básicos (PIATTI; RODRIGUES, 2005).

A classificação dos polímeros obedece aos mais diversos critérios, assim como pode-se observar no quadro 1.

Quadro 1. Critérios para Classificação de Polímeros

Classificação dos polímeros	
Critério	Classe do polímero
Origem do polímero	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Natural ✓ Sintético
Número de monômeros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Homopolímero ✓ Copolímero
Método de preparação do polímero	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Polímero de adição ✓ Polímero de condensação ✓ Modificação de outro polímero
Estrutura química de cadeia polimérica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Poli-hidrocarboneto ✓ Poliamida ✓ Poliéster ✓ Etc
Encadeamento de cadeia polimérica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sequencia cabeça-cauda ✓ Sequencia cabeça-cabeça, cauda-cauda
Configuração dos átomos de cadeia polimérica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sequencia cis ✓ Sequencia trans
Taticidade da cadeia polimérica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Isotático ✓ Sindotático ✓ Atático
Fusibilidade e/ou solubilidade do polímero	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Termoplástico ✓ Termotígido
Comportamento mecânico do polímero	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Borracha ou elastômero ✓ Plástico ✓ Fibra

Fonte: MANO e MENDES (1999)

Segundo Júnior (2017) existem mais de mil variedades de polímeros catalogados, dentre eles, os principais e mais consumidos são o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS), o policloreto de vinila (PVC) e o poliéster (PET). O PE, PP, OS, PVC e o PET, representam cerca de 90% do consumo nacional (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

2.4.2. Reciclagem dos polímeros

A eficiência, durabilidade e baixo custo dos polímeros o tornaram essenciais no dia-a-dia e tais características ocasionaram na substituição de vários materiais pelo plástico, o que aumentou a intensidade de seu consumo e produção. Em consequência disto, surge um problema de proporções ambientais, visto que, grande parte dos resíduos poliméricos são descartados inadequadamente, gerando acúmulo e poluição.

A produção de plásticos primários e secundários desde 1950 é cerca 8,9 bilhões de toneladas, das quais, 6,3 bilhões tornaram-se lixo. Estima-se que até o ano de 2015 foram gerados cerca de 6300 milhões de toneladas de resíduos poliméricos, desta quantidade aproximadamente 9% foi reciclado, 12% incinerado e um total de 79% ficou acumulado em aterros ou ao ar livre. Pode-se ainda julgar que, caso tais tendências permaneçam, em 2050, cerca de 12 000 milhões de toneladas de resíduos de plástico estará em aterros ou descartados inapropriadamente ao ar livre (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Os oceanos também são locais de descarte dos resíduos poliméricos. cerca de 280 milhões de toneladas de resíduos poliméricos são gerados e desta quantidade, 14 milhões de toneladas são descartadas nos oceanos, causando um impacto negativo ao meio ambiente e ao ecossistema marinho.

O agravante do descarte inapropriado dos polímeros está no grau de dificuldade de extinguir este material da natureza, visto que as ligações químicas que tornam o plástico tão durável, são as mesmas que lhes confere resistência no processo de biodegradação (CROTI, 2018).

O Brasil perde grande potência energético e econômicos no que se refere aos resíduos poliméricos e seu aproveitamento, dado que, os mesmos, em sua maioria, terminam nos lixões.

Segundo o estudo realizado pelo fundo mundial da natureza no relatório “Solucionar a Poluição Plástica – Transparência e Responsabilização” o Brasil é o 4.º produtor mundial de plástico e produz em média 11 milhões de lixo polimérico anualmente, o que o torna um dos maiores produtores de resíduos poliméricos. Além disto, o Brasil é um dos países que menos reciclam seus resíduos poliméricos, o mesmo está abaixo da média mundial, que é de 9%. Em consequência disto, da falta de investimento e coleta dos resíduos poliméricos o Brasil deixa de ganhar cerca de 4,0 bilhões por ano (GUAMÁ et al., 2008).

A reciclagem dos polímeros pode ser pré-consumo (reciclagem de peças defeituosas, por exemplo), ou pós-consumo. Além disso, pode-se classificar o processo de reciclagem dos mesmos em reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária.

A reciclagem primária consiste no reaproveitamento dos polímeros ainda na linha de produção, ou seja, o material a ser reciclado é convertido em materiais com características similares à dos polímeros virgens (SPINACÉ; PAOLI, 2005). Já na reciclagem secundária os resíduos plásticos são convertidos em um mesmo material, entretanto de menor valor agregado.

A reciclagem terciária, ou reciclagem química, é a conversão dos polímeros em moléculas menores, as quais podem ser utilizadas para produzir outros produtos (AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2010). Em outras palavras, a reciclagem terciária refere-se a um processo de quebras de ligações poliméricas e obtenção de frações sólidas, gasosas e líquidas. Um exemplo de reciclagem química é a pirólise.

Na reciclagem quaternária, também chamada de energética, ocorre a recuperação da energia dos resíduos através de uma incineração controlada. (SPINACÉ e PAOLI, 2005).

A maneira mais viável e eficiente de extinguir definitivamente os resíduos poliméricos é através do tratamento térmico destrutivo, como por exemplo, o processo de pirólise (GEYER et al., 2017) e o processo de gaseificação.

2.5. TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TÉRMICA

De acordo com Costa (2006) a reciclagem dos materiais poliméricos, seja no que se refere ao fator econômico ou ao fator ambiental deve envolver a recuperação energética, considerando que os processos de tecnologia de conversão térmica

combinam a recuperação energética com sustentabilidade e viabilidade econômica, elas podem ser consideradas umas das mais eficientes formas de reciclagem tanto dos polímeros quanto dos resíduos sólidos urbanos de forma geral.

Associado aos resíduos existe um grande potencial energético, desta forma, tal potencial pode ser recuperado. Existe uma gama de processos e tecnologias que possibilitam a conversão de resíduos sólidos urbanos em energia ou combustíveis, tais processos podem ser bioquímicos ou termoquímicos. De acordo com Mavrotas (2013) os processos termoquímicos, atualmente, têm se tornado de suma importância para gestão e reciclagem dos resíduos sólidos urbanos.

A conversão dos RSU a partir de tecnologias termoquímicas é basicamente um processo no qual altera-se a estrutura física e o produto químico a partir do fornecimento de calor, tal processo destina-se a obtenção de combustíveis e produtos químicos. No tocante aos processos termoquímicos aplicados a conversão dos RSU pode-se citar como mais relevantes, segundo Belgiorno et al. (2002) os processos de pirólise, gaseificação e incineração (combustão).

A escolha da tecnologia mais adequada dependerá da matéria prima, ou seja, do resíduo que se deseja converter, além do produto de interesse, o que torna primordial o conhecimento de cada processo em particular afim de selecioná-lo como uma tecnologia viável de conversão.

Entre os processos termoquímicos pode-se destacar o processo de pirólise que se apresenta como uma alternativa para recuperação e geração de energia renovável e a gaseificação. De acordo com Couto et al. (2017) e Sikarwar et al (2017) a gaseificação é um processo propício e proporciona uma solução para a disposição, destinação e ainda é uma solução alternativas quanto a problemas energéticos.

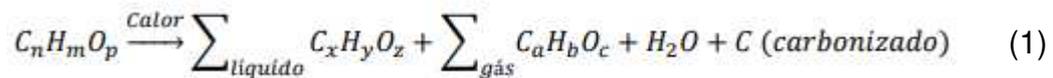
Diversos países, a exemplo do Japão e Canadá, destacam-se nas tecnologias para recuperação energética dos RSU e em estudos para utilização da gaseificação com essa finalidade, o referido processo é considerado, atualmente, uma das alternativas mais viáveis e promitente no tocante ao tratamento e recuperação dos RSU (MATERAZZI et al., 2013).

2.5.1. Pirólise

Pirólise do grego pyr (fogo) e lysis (desprendimento), de acordo com Zheng, J., et al (2009) é o processo base de grande parte dos processos termoquímicos, nesse

processo é realizada a decomposição de compostos orgânicos através da ação do calor e na ausência de oxigênio (BRAIDO, 2014). A pirólise é um processo milenar, registros egípcios comprovam que ele era utilizado para a obtenção de produtos utilizados em processos de embalsamento e na indústria náutica (COSTA, 2006).

A Equação 1 apresenta a equação genérica do processo de pirólise.

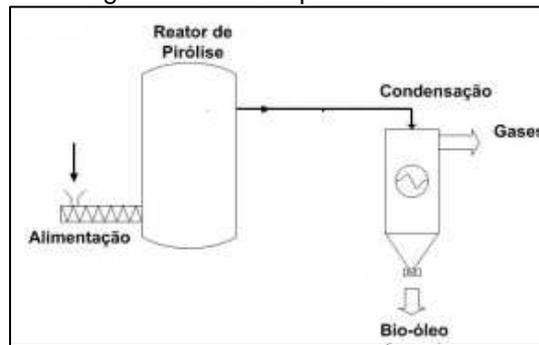


Assim como é possível observar na equação genérica do processo de pirólise presente na Equação 1, ao fornecer calor a matéria orgânica os hidrocarbonetos decompõe-se em moléculas menores convertendo dessa forma a matéria orgânica em frações gasosas, sólidas e líquidas. As proporções das frações dependem do método e parâmetros utilizados durante a pirólise como, por exemplo, pressão e temperatura (COSTA, 2006). Em suma, pode-se dizer que o processo de pirólise se refere a uma reação endotérmica que necessita de calor para ocorrer e tem como produto final gases, sólidos e líquidos.

Além de ser necessário calor para que aconteça o processo de pirólise é necessário também um ambiente com ausência de oxigênio. A matéria-prima que será submetida ao referido processo deve ser aquecida até que o sistema atinja uma temperatura específica denominada temperatura de pirólise, a qual pode variar dependendo do tipo de pirólise. A temperatura de pirólise varia entre 300 °C e 600 °C (BASU, 2013).

Na Figura 7 é possível observar a representação de um reator de pirólise assim como o processo de pirólise. No processo mencionado, inicialmente o material a ser pirolisado é armazenado no reator e aquecido até que atinja a temperatura de pirólise, na qual se inicia a decomposição. Os vapores liberados, condensáveis e não condensáveis, saem do reator, enquanto o sólido formado permanece no mesmo e parte é liberado (particulado) com o gás. Ao passar pelo condensador o gás é separado do carvão e resfriado gerando assim o condensado, denominado óleo de pirólise, os gases não condensáveis deixam o condensador como produto gasoso (BASU, 2010).

Figura 7. Plata de pirólise



Fonte: Adaptado de VELÉZ (2017)

O processo de pirólise é classificado de acordo com os parâmetros e condições em que ocorre, a título de exemplo: velocidade de aquecimento, temperatura de reação, pressão utilizada, tempo de residência dos produtos no meio reacional, entre outros. Dessa maneira de acordo com as variáveis de operação do processo a pirólise é classificada em pirólise lenta, pirólise rápida, pirólise instantânea, gasificação pirolítica e pirólise a vácuo.

2.5.1.1 Pirólise: Classificação

A classificação e descrição do processo de pirólise de acordo com as condições em que o mesmo ocorre de acordo com Paradela (2012) são:

- Pirólise lenta: também denominada carbonização. Nessa categoria de pirólise a velocidade de aquecimento é baixa - menor que 2 °C/s, assim como a temperatura - menor que 500 °C e o tempo de residência é elevado. A pirólise lenta é utilizada quando o objetivo é a obtenção de uma máxima quantidade de resíduo de carbono (fração sólida).
- Pirólise rápida: Acontece em elevadas velocidades de aquecimento - 10 a 200 °C/s, baixo tempo de residência - 0,5 a 2 s, e temperatura moderada – em torno de 600 °C/s. Essas condições de processo são utilizadas quando o objetivo é a máxima produção da fração líquida, visto que, os vapores formados são rapidamente resfriados para condensarem.
- Pirólise instantânea: ocorre em velocidades de aquecimento ainda mais elevadas do que na pirólise rápida - maiores que 1000 °C/s – os tempos de residência também são ainda menores – alcançados a partir da utilização de partículas muito pequenas do material.

- Gasificação pirolítica: as condições em que ocorre esse processo de pirólise tem a finalidade de obter uma máxima fração dos gases, utiliza-se altas temperaturas e elevados tempos de residência.
- Pirólise sob vácuo: tem o objetivo de reduzir o ponto de ebulição, evitando reações químicas adversas, nesse processo o material orgânico é aquecido à vácuo.

Avaliando as categorias de pirólise e suas respectivas condições de processo, evidencia-se que a escolha do processo e suas condições depende sobretudo da do principal produto de interesse que se deseja obter, por exemplo, se o objetivo é a obtenção de carvão, a pirólise lenta é mais adequada, enquanto que, quando o principal objetivo é a obtenção do óleo de pirólise é mais viável utilizar o processo de pirólise rápida.

2.5.1.2 Condições Operacionais do Processo de Pirólise

Vários parâmetros influenciam o processo de pirólise e as frações do produto final, no quadro 2 4 é possível observar os fatores e condições operacionais e de que forma eles afetam a distribuição dos produtos obtidos.

Quadro 2. Parâmetros que afetam a distribuição dos produtos de pirólise

Parâmetro	Efeito
Composição química.	Os produtos primários da pirólise estão diretamente relacionados com a estrutura e composição dos reagentes, e também com o mecanismo da sua decomposição (puramente térmico ou catalítico).
Temperatura de pirólise e velocidade de aquecimento.	Temperaturas mais elevadas e maiores velocidades de aquecimento aumentam a quebra das ligações e favorecem a produção de pequenas moléculas.
Tempo de Pirólise	Maiores tempos de residência favorecem uma conversão secundária dos produtos primários, produzindo mais resíduo carbonoso, alcatrões, bem como produtos termicamente mais estáveis, diminuindo assim o efeito da estrutura original do polímero.
Tipo de reator	Determina principalmente a qualidade da transferência de calor, da mistura,

	dos tempos de residência de gases líquidos, e o grau de libertação de produtos primários.
Pressão de operação	Pressões baixas reduzem a condensação de fragmentos reativos formando mais resíduo carbonoso
Presença de gases reativos como oxigénio (ar), e hidrogénio	Gera calor internamente através de oxidações parciais, dilui os produtos e influencia equilíbrios, cinéticas e mecanismos
Uso de catalisador	O seu uso influencia os mecanismos e a cinética, logo, a distribuição dos produtos.
Aditivos incorporados	Geralmente evaporam ou decompõem-se. Apenas em casos pontuais poderão influenciar a cinética ou o mecanismo da reação.
Fase líquida ou gasosa	A pirólise em fase líquida retarda a libertação dos produtos de reação, favorecendo assim interações posteriores entre eles.

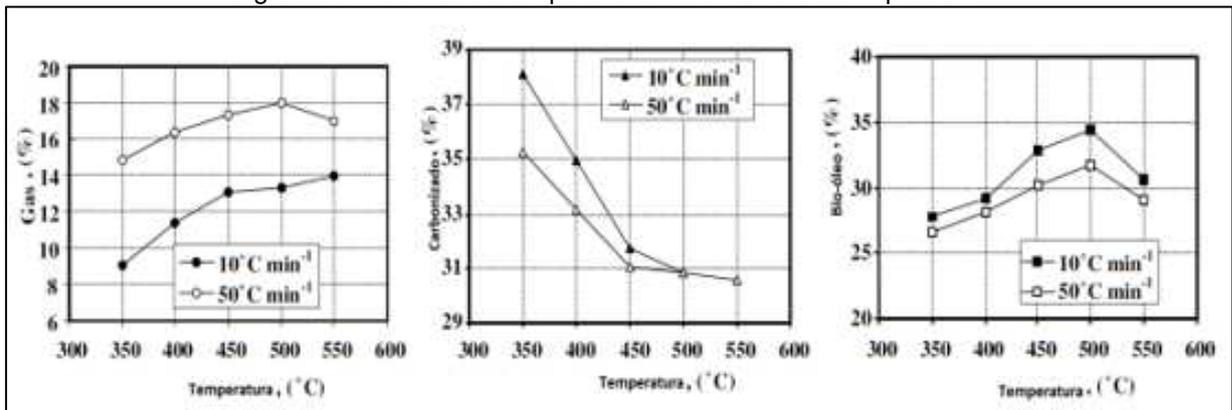
Fonte: PARADELA (2012)

O processo de pirólise aplicado aos resíduos sólidos tem a finalidade de convertê-los em produtos de alto valor agregado (MIRANDA, 2016). Atualmente o principal objetivo ao realizar este processo é a obtenção da fração líquida - rica em hidrocarbonetos e com características similares ao óleo do petróleo cru - pois este produto pode ser empregado na produção de combustíveis ou como matéria-prima para indústrias (PARADELA 2012).

Um dos principais fatores que influencia no processo de pirólise e quantidade dos produtos formados é a temperatura de operação. Baixas temperaturas maximizam a quantidade de carvão formado enquanto que altas temperaturas minimizam a quantidade do mesmo.

No gráfico presente na Figura 8 é possível observar a influência da temperatura no rendimento das frações dos produtos da pirólise.

Figura 8. Influência da temperatura no rendimento dos produtos



Fonte: Adaptado de SENSOZ et al. (2006)

Ao analisar a Figura 8 é possível verificar que um incremento na temperatura de operação ocasiona uma diminuição do rendimento da fração sólida, em contrapartida o rendimento do gás aumenta. Referente ao rendimento da fração líquida e seu comportamento quanto a temperatura é possível observar um pico em 500 °C, nessa temperatura, a quantidade do óleo de pirólise é máxima. Silva (2016) relata que a temperatura ótima para o processo de pirólise, no qual o produto de interesse é o óleo de pirólise é entre 400 °C e 500 °C.

Deve-se atentar para o controle da temperatura, principalmente quando o produto de interesse é o óleo de pirólise, pois de acordo com Sensoz et al. (2006) em temperaturas muito elevadas o rendimento do óleo de pirólise diminui, isso ocorre devido ao fato de que em temperaturas superiores, as ligações podem quebrar e conseqüentemente ocorrerá maior formação de gases decaindo assim a quantidade de óleo de pirólise produzido.

2.5.1.3 Produtos da Pirólise

Os primeiros produtos formados na pirólise são o Carbonizado e os gases, a partir dos gases originam-se a fração líquida e aos gases não condensáveis (SILVA, 2016).

O produto sólido obtido no processo de pirólise é o carbonizado, ele é composto principalmente por carbono, entretanto, de acordo com Silva (2016) o carbonizado pode conter oxigênio e hidrogênio. Esse produto pode ser utilizado como um produto comercial, Crotti (2018) menciona que a fração sólida obtida no processo de pirólise,

ou seja, o carbonizado, pode ser utilizado como um combustível sólido ou carvão ativado.

O óleo de pirólise, fração líquida obtida no processo é um líquido escuro constituído por uma mistura de hidrocarbonetos e mesmo que seja um óleo quimicamente complexo e termicamente instável é facilmente transportado e pode ser utilizado em usinas de energia, turbina a gás e ainda ser utilizado como combustível alternativo para meios de transporte (ERTAS; MEHMET, 2010). A composição do óleo de pirólise está relacionada diretamente com o tipo de matéria-prima utilizada no processo.

Vale ressaltar que, apesar do grande potencial da fração líquida no que se refere a sua utilização como combustível alternativos, alguns fatores limitam a aplicação do óleo obtido para a referida finalidade, de acordo com Radlein (2010) esses fatores são: Resquícios de carvão no óleo de pirólise, presença de multifases líquidas, envelhecimento, alto índice de acidez, variabilidade das propriedades físico-químicas, estabilidade térmica durante o armazenamento.

A partir de um processo de separação é possível ainda obter três frações distintas do óleo de pirólise, a partir do processo realizado em uma coluna de separação obtém-se as frações: leve, média e pesada. No topo da coluna consegue-se o óleo de menor densidade (o querosene), o óleo obtido na fração média é armazenado como fonte de energia térmica e a fração pesada é sólida à temperatura ambiente. (SCHEIRS; KAMINSKY, 2006)

O produto da pirólise correspondente a fração gasosa são os gases não condensáveis, essa fração também é um combustível e constitui-se, de acordo com Silva (2016), por hidrogênio, dióxido de carbono, vapor de água, monóxido de carbono e hidrocarbonetos. Os gases não condensáveis podem ser reutilizados na própria planta de pirólise entre outras aplicações.

2.5.1.4. Pré-Tratamento

O pré-tratamento do processo de pirólise corresponde as condições da matéria-prima, tais condições também é um fator de suma importância, dado que, influencia na composição do produto final. Dois fatores relacionados ao estado da matéria orgânica antes da entrada no reator de pirólise é a umidade e a granulometria.

É recomendável que a matéria-prima passe por um processo de secagem antes do processo de pirólise, visto que, de acordo com Silva (2016) quando a matéria orgânica apresenta uma grande quantidade de água a mesma influenciará diretamente no produto da pirólise, pois pode ser liberado vapor de água favorecendo a formação de produtos menos desejáveis.

No que se refere a granulometria, a matéria-prima deve passar por um processo de trituração afim de diminuir o tamanho das partículas e dessa forma submetê-la a uma melhor transferência de calor.

2.5.2 Gaseificação

O processo de gaseificação é, atualmente, considerado uma nova e atual tecnologia de conversão térmica, entretanto, esse processo é antigo aparecendo de na história da humanidade desde os anos de 1850 a 1940 quando o carvão mineral era utilizado para a produção de gás com a finalidade de a iluminar casas e ruas e também para aquecimento. Anos depois a gaseificação passou a ser aplicada na produção de combustíveis sintéticos, estando ainda presente na segunda guerra mundial com a produção de óleos sintéticos a partir dos processos de Fischer-Tropsch e Bergius. Com a primeira crise do petróleo ocorreu a intensificação das pesquisas referentes a fontes alternativas de energia, sendo uma delas o produto obtido no processo de gaseificação, tais pesquisas perduram até os dias atuais (CRUZ, 2012).

Frente a questão ambiental, possível escassez dos combustíveis fósseis, acréscimo no valor dos mesmos e considerando ainda a preocupação mundial referente a tais assuntos que estão cada dia mais em foco, o interesse na gaseificação de RSU, assim como da biomassa, rejeitos industriais entre outros vem crescendo continuamente (NEATHERY, 2010).

Násner (2015) cita que estudos e projetos voltados a gaseificação do carvão e de resíduos têm sido investigados e desenvolvidos nos últimos anos, entretanto, no que se refere-se à gaseificação em escala industrial de resíduos sólidos urbanos, tal tecnologia ainda é mais limitada do que a gaseificação do carvão.

Vale enfatizar o quão promissor é o processo de gaseificação no tratamento de RSU, principalmente no tocante a sustentabilidade e gestão dos mesmos, de acordo com Arafat, Jijakli e Ahsan (2015), o processo de gaseificação é sugerido como um processo ambientalmente correto para a maioria dos resíduos sólidos. De acordo com

Cruz (2012) pesquisas têm registrado o referido processo como a melhor alternativa para o tratamento, reciclagem e recuperação energética dos RSU.

A gaseificação é uma tecnologia de conversão térmica que a partir da combustão parcial de um combustível sólido ou líquido é convertido em combustível gasoso, ela é também denominada combustão incompleta.

Lisboa (2016) define o processo de gaseificação como uma reação de oxidação térmica e parcial que tem um produto composto basicamente de gases (CO_2 , H_2O , CO , H_2 e hidrocarbonetos gasosos) podendo apresentar também pequenas quantidades de carvão, cinzas e compostos condensáveis. Esse processo é possível ao submeter a matéria-prima a altas temperaturas, entre 800 a 1000 °C e a um agente oxidante, também denominado agentes de gaseificação.

Em suma pode-se dizer que a gaseificação é uma reação de combustão incompleta da matéria orgânica no estado sólido ou líquido com adição de uma agente de gaseificação que pode ser ar, oxigênio, vapor de água ou uma mistura dos mesmos.

Uma reação de combustão é completa quando todo carbono é convertido em dióxido de carbono (CO_2) e todo hidrogênio em água, já em uma combustão incompleta, o carbono e o hidrogênio são convertidos parcialmente e os produtos da reação são monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2) dentre outros produtos que irão compor o gás de síntese também chamado de *Syngas*.

Em termos de poder calorífico (PCI), importante propriedade dos combustíveis, na combustão completa os produtos apresentam um baixo PCI e dessa forma não são úteis, enquanto que na combustão incompleta (gaseificação) os gases obtidos tem alto PCI, dessa forma, eles são gases combustíveis e podem ser utilizados para uma queima posterior.

O produto obtido no processo de gaseificação é denominado gás de síntese. Ele apresenta várias aplicações, dentre elas, a possibilidade de síntese de outros produtos a exemplo da síntese do hidrogênio.

Conhecido o fato de que a gaseificação é uma reação de combustão incompleta ela deve acontecer em condições pobres em oxigênio, em outras palavras, deve existir oxigênio em quantidade inferior a necessária para a ocorrência de uma combustão completa.

Considerando a natureza da matéria-prima (matéria orgânica) o processo de gaseificação é complexo e envolve várias reações químicas as quais convertem a

matéria-prima em uma mistura de gases, tal conversão acontece com a utilização de um fluido inserido no reator, o agente de gaseificação. Além disto, as variáveis do processo, como por exemplo, temperatura e pressão precisam ser controladas. Vale salientar que o tipo de reator no qual as reações de gaseificação ocorrem também influenciam no processo.

Geralmente o processo de pirólise antecede o processo de gaseificação, ou seja, antes da matéria-prima passar pelo processo de gaseificação, ela passa primeiro por um processo de pirólise pois, de acordo com Van Swaaij et al. (2004), quando a matéria-prima é convertida em um líquido a partir do processo de pirólise para depois passar pelo processo de gaseificação evita-se algumas dificuldades na rota da obtenção do gás de síntese.

Fatores como razão de equivalência (fator de ar), tipo e agente de gaseificação, tempo de residência, características e composição da matéria prima, além da presença ou ausência de catalisadores irão influenciar no desempenho do processo de gaseificação.

2.5.2.1. Zonas de Gaseificação

Assim como mencionado, o processo de gaseificação envolve várias reações, porém, quatro processos principais compõem o processo de gaseificação, a secagem, a pirólise, a combustão (ou oxidação) e a redução, esses processos são chamados de zonas de gaseificação.

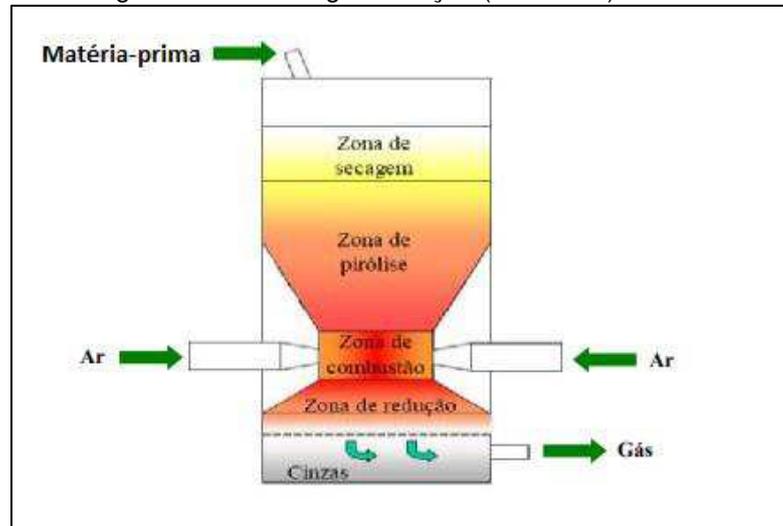
Vale ressaltar que, assim como no processo de pirólise, as condições da matéria-prima podem influenciar no produto final, logo, a mesma deve passar por um pré-tratamento para ajuste da umidade e granulometria.

O pré-tratamento é importante visto que segundo Araújo (2016) o tamanho das partículas influencia no processo pois interfere na transferência de massa e calor e reações químicas. A umidade da matéria prima também é uma variável importante e deve passar por uma adequação em um processo de secagem de forma a minimizar a energia fornecida as demais etapas.

Segundo Figueiredo (2018) durante a gaseificação a matéria-prima, por gravidade, move-se da região de menor temperatura até a região de maior temperatura passando assim pelas zonas de gaseificação que se caracterizam por temperaturas e reações bem definidas.

Na Figura 9 é possível observar o esquema de um gaseificador assim como as zonas de gaseificação. É importante destacar que de acordo com Basu (2013) essas zonas sobrepõem-se e desta forma não há uma região limitante entre elas.

Figura 9. Zonas de gaseificação (Leito Fixo)



Fonte: Adaptado de SILVA LORA (2008).

A primeira zona é a zona de secagem, que se situa mais próximo ao reator. Nessa zona, o combustível (matéria-prima) ao receber calor libera a umidade nele existente, desta forma, ele chega na zona de pirólise desidratado (base seca).

Na zona de pirólise, o calor residual da queima que ocorre na zona de combustão, passa pela matéria prima seca (sem a presença de ar) e vai liberar o alcatrão e carbono fixo. O alcatrão chega à zona de combustão - zona de maior temperatura - onde ocorre a combustão completa, nessa zona é liberado H₂O e CO₂.

A água e o dióxido de carbono liberados seguem para a zona de redução e ocorre as reações de redução presentes nas Equações 2 e 3, gerando assim o gás de síntese.



As reações que ocorrem na gaseificação são basicamente combinações do oxigênio com carbono e hidrogênio. O "char" que é obtido durante a zona de pirólise converte-se em CO, CH₄ e H₂ (NÁSNER, 2015).

Destaca-se que o processo de pirólise no processo de gaseificação e o processo de pirólise são distintos. A pirólise no processo de gaseificação acontece em consequência de o agente oxidante ainda não reagir com a matéria-prima,

posteriormente tal processo será exposto a presença do oxigênio, ar e/ou vapor d'água. Já no processo de pirólise toda reação acontece em condições anóxicas (CRUZ, 2012).

O processo de gaseificação é classificado segundo o tipo de reator utilizado segundo Anjos (2017) essa classificação pode também ser subdividida segundo o funcionamento de cada reator.

2.5.2.2. Gaseificação: reações e modelos

O processo de gaseificação é constituído por um conjunto de reações que ocorrem nas diferentes zonas de gaseificação ou de maneira simultânea durante todo o processo. O Quadro 1 resume as principais reações que acontecem no processo de gaseificação.

Quadro 3. Reações do processo de gaseificação

Nº	Reação de Gaseificação	Tipo
1	$\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	Reação Com Oxigênio
2	$\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	
3	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	
4	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	Reação Com água
5	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	
6	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	
7	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	Reação Bourdourd
8	$\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$	Reação de metanação
6	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	
10	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	

Fonte: Adaptado de MENDONZA (2015)

Dentre as reações presentes no quadro 3, a reação de oxidação refere-se a combustão incompleta do carbono que constitui a matéria-prima, a qual o agente de gaseificação é responsável.

Segundo Lora et al. (2012) as reações gás-água ou reação carbono-vapor e de shift, água/gás, são favorecidas quando se utiliza vapor como agente de gaseificação.

Dentre as reações do processo de gaseificação uma das mais importante é a de gaseificação do carvão produzido na pirólise. Uma outra reação de suma importância é a gaseificação do carbono por vapor de água, uma vez que, a partir dessa reação e do meio reacional ocorre a produção de metano e monóxido de

carbono ou hidrogênio e monóxido de carbono. A reação conhecida como reação de hidrogaseificação (gaseificação do carbono em meio rico em hidrogênio) é a principal rota para formação do metano. Vale destacar que Reação de Boudouard em temperaturas inferiores a 1000 K é insignificante, dado que, nessas condições apresenta baixa taxa de reação (ARAÚJO, 2016).

A extensão das reações que constituem o processo de gaseificação é de acordo com a proximidade do equilíbrio termodinâmico, no qual o sistema atinge uma composição mais estável e garante, termodinamicamente, uma maior conversão. A abordagem do modelo de gaseificação pode ser de acordo com a estequiometria, na qual adota-se uma taxa de reação a uma certa temperatura ou pode-se utilizar a abordagem que consiste na minimização da energia livre de Gibbs para modelar o sistema. A energia livre de Gibbs trata-se de uma função termodinâmica que na condição de equilíbrio químico atinge seu valor mínimo (ARAÚJO, 2016 apud LIA et al., 2003).

Nas condições em que se desconhece informações sobre o mecanismo da reação ou que a composição da corrente de alimentação não é bem definida a abordagem da minimização da energia livre de Gibbs é mais adequada visto que para sua utilização são necessárias apenas a composição elementar da matéria-prima.

2.5.2.3. Agentes de gaseificação

Para que ocorra a gaseificação, é necessária a adição de fluidos no reator no qual é depositada a matéria-prima. De acordo com Násner (2015) tais fluidos reagem com os hidrocarbonetos pesados e com o carbono sólido convertendo-os em gases de baixo peso molecular (CO e H_2). Esses fluidos são denominados agentes de gaseificação.

Os agentes de gaseificação utilizados são: ar, oxigênio e/ou vapor de água, é possível ainda utilizar uma mistura dos mesmos. A escolha do agente de gaseificação é de suma importância, ela deve ser feita considerando a qualidade do gás que se deseja obter como produto final, dado que o agente de gaseificação influencia diretamente na composição do gás de síntese.

O ar é uma mistura de gases, entretanto, ele é composto principalmente por nitrogênio. Vale salientar que, devido ao nitrogênio ser um gás inerte, o mesmo não favorece o gás de síntese no tocante ao poder calorífico, além disso, o nitrogênio irá

diluí-lo. Desta forma, quanto maior a quantidade de nitrogênio, maior será a parcela do gás que não irá reagir para produzir energia.

A vantagem de utilizar o ar como agente de gaseificação está associada a viabilidade econômica, pois o ar é economicamente acessível, entretanto, Lora et al. (2012) ressalta que o gás obtido no processo de gaseificação utilizando ar como agente de gaseificação apresenta um PCI entre 3 e 6 MJ/Nm³ e devido seu baixo poder calorífico é chamado de gás pobre, seu PCI é aproximadamente dez vezes menos que o do gás natural.

Quando o interesse do processo de gaseificação é produção de compostos químicos a partir do gás de síntese deve-se remover o N₂, desta forma, para tal finalidade, utilizar o ar como agente de gaseificação é inviável uma vez que o mesmo aumenta a concentração de N₂ no gás (LORA et al., 2012).

Quando no processo de gaseificação o agente de gaseificação é o oxigênio, o gás produzido apresenta um PCI maior em relação ao gás obtido com o processo de gaseificação com ar, de acordo com Lora et al. (2012) o gás obtido apresenta um PCI entre 10 e 19 MJ/Nm³.

Vale salientar que quando se utiliza oxigênio no processo, sua vazão elevada pode atingir altas temperaturas danificando os equipamentos, desta forma, deve-se ter atenção a temperatura do processo e ao controle da vazão do oxigênio. Além disto, a utilização desse agente de gaseificação exige que uma purificação do ar seja feita, de modo a obter o oxigênio puro. De acordo com Araújo (2016) a utilização de oxigênio como agente aumenta o rendimento de CO e CO₂ no gás.

Quando vapor de água é utilizado no processo de gaseificação no gás obtido ocorre uma maior formação de hidrogênio H₂ o que conseqüentemente produz um gás com alto PCI, desse modo, quanto maior a fração de H₂ na composição do gás de síntese, maior o poder calorífico. Uma desvantagem da utilização do vapor de água como agente gaseificação é a necessidade de um gerador de vapor.

Ao utilizar vapor como agente de gaseificação o gás de síntese tem maior composição de produtos com uma alta relação hidrogênio/carbono devido esses produtos serem compostos por uma maior concentração de hidrogênio por unidade de carbono (ARAÚJO, 2016).

O Quadro 4 resume os principais agentes de gaseificação, suas vantagens e dificuldades técnicas.

Quadro 4. Principais agente de gaseificação

Agente de gaseificação	Vantagens	Dificuldades técnicas
Ar	Baixo custo, é o mais barato; Combustão da matéria-prima para fornecimento da energia necessária ao processo; Teor de particulados e de alcatrão moderados dependentes do t�ipo de gaseificador.	Baixo poder calorifico do gás
Vapor de �gua	Alto poder calorífico; Alto teor de H ₂ no gás	Requer fornecimento de calor externo (gerador de vapor) Acrescimento do teor de alcatrão no gás produzido e necessidade de limpeza catalítica.
Oxigênio	O gás de síntese não � diluído por nitrogênio; Ausência do alcatrão no gás produzido como consequências das altas temperaturas de opera�o; Permite a gaseifica�o da matéria-prima em estado líquido.	Necessidade da plata de separa�o de ar Altas temperaturas de gaseifica�o Geralmente o uso do oxig�nio puro � considerado apenas em gaseificadores de leito arrastado
D�oxido de Carbono	Altos valores de poder calorifico do gás; Altos valores de H ₂ e CO no gás	Requer aquecimento indireto Requer limpeza catalítica do gás Requer altas temperaturas para que CO ₂ possa ter reatividade

Fonte: Adaptado de LORA ET AL (2012)

Sabe-se que o processo de gaseifica o necessita de um ambiente pobre em oxig nio, dessa forma a inje o do agente de gaseifica o deve ser controlada de modo a permitir a ocorrência da combustão incompleta e das rea o es de oxida o e redu o. Assim,   necessário existir uma razão entre a quantidade de agente de gaseifica o inserido e a quantidade de matéria-prima.

2.5.2.4. Razão matéria prima/agente de gaseifica o

O agente de gaseificação é um dos principais e mais importantes parâmetros da gaseificação, a razão entre a vazão de entrada do mesmo e da matéria-prima é de suma importância na qualidade do produto final do processo.

A relação entre a quantidade de agente de gaseificação inserido no reator e o combustível (matéria-prima) alimentado no mesmo dependerá do agente de gaseificação utilizado. Essa relação é denominada razão de equivalência (RE), quando o fluido utilizado é o ar e razão vapor/biomassa (SBR), quando o fluido é o vapor d'água. Ao utilizar vapor de oxigênio o nome dado para a referida relação é razão de gaseificação (RG) e quando se utiliza o CO₂ como agente de gaseificação se tem a razão CO₂/C (ANJOS, 2017).

A razão de equivalência (RE) presente na Equação 4 é a razão ar/combustível utilizada no processo de gaseificação e a quantidade oxigênio necessária para que a combustão completa ocorra.

$$RE = \frac{(A_{a/c})_{real}}{(A_{a/c})_{estequiométrica}} \quad (4)$$

Na Equação 4 $(A_{a/c})_{real}$ é a razão combustível/ar real do processo e $(A_{a/c})_{estequiométrica}$ é a relação ar/combustível necessária para combustão completa do combustível (matéria-prima). Desta forma, o fator de ar é o que definirá a quantidade de combustível queimado com relação a quantidade gaseificada.

Analisando a equação que define a razão de equivalência é possível concluir que para valores de RE maiores que 1 ocorre combustão completa e para valores de RE nulos o processo que ocorre é o processo de pirólise (já que existirá uma ausência de O₂), desta forma, o processo de gaseificação ocorre quando $0 < RE < 1$.

A relação ar/combustível estequiométrica (m^3) pode ser determinada, segundo Lora (2012) em função da análise elementar (base úmida) da matéria-prima utilizada no processo de gaseificação segundo a Equação 5.

$$(R_{a/c})_{esgtequiométrica} = 0,0889(C + 0,375xS) + 0,265H - 0,0333O \quad (5)$$

De acordo com Siedlecki et al. (2011) dados existentes na literatura revelam que quando a razão de equivalência se encontra em uma faixa de 0,2 a 0,4 o gás produzido no processo apresenta maiores concentrações de CO e H₂.

A razão vapor/biomassa (SBR) - Equação 6 - é a razão entre a quantidade de vapor inserida no gaseificador (fluxo mássico) e a quantidade de biomassa (ou outra matéria prima como por exemplo o RSU) alimentada no reator.

$$SBR = \frac{FLUXO_MASSICO_VAPOR}{FLUXO_MASSICO_COMBUSTÍVEL} \quad (6)$$

Vale salientar a ação do vapor como, além de agente de gaseificação, um promotor da fluidização. Siedlecki (2011) menciona que é pertinente um agente de gaseificação que apresente a duas aplicações mencionadas. O estudo realizado por Gil et al. (1999), revela que a razão SBR que otimiza e aumenta a concentração de H₂ no gás de síntese é entre 0,8 e 0,9.

2.5.2.5 Gás De Síntese

A mistura de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO) é nomeada gás de síntese ou Syngas, esse nome é devido ao fato dessa mistura gasosa ser utilizado para a síntese de vários produtos. O gás de síntese é obtido a partir do gás natural, petróleo, biomassa e resíduos orgânico (LORA et al., 2012).

Uma vez que o gás gerado no processo de gaseificação é uma mistura rica em H₂ e CO pode-se dizer que se obtém durante o referido processo o gás de síntese, entretanto, sua composição depende das condições de operação do processo e também do tipo de matéria-prima e agente de gaseificação.

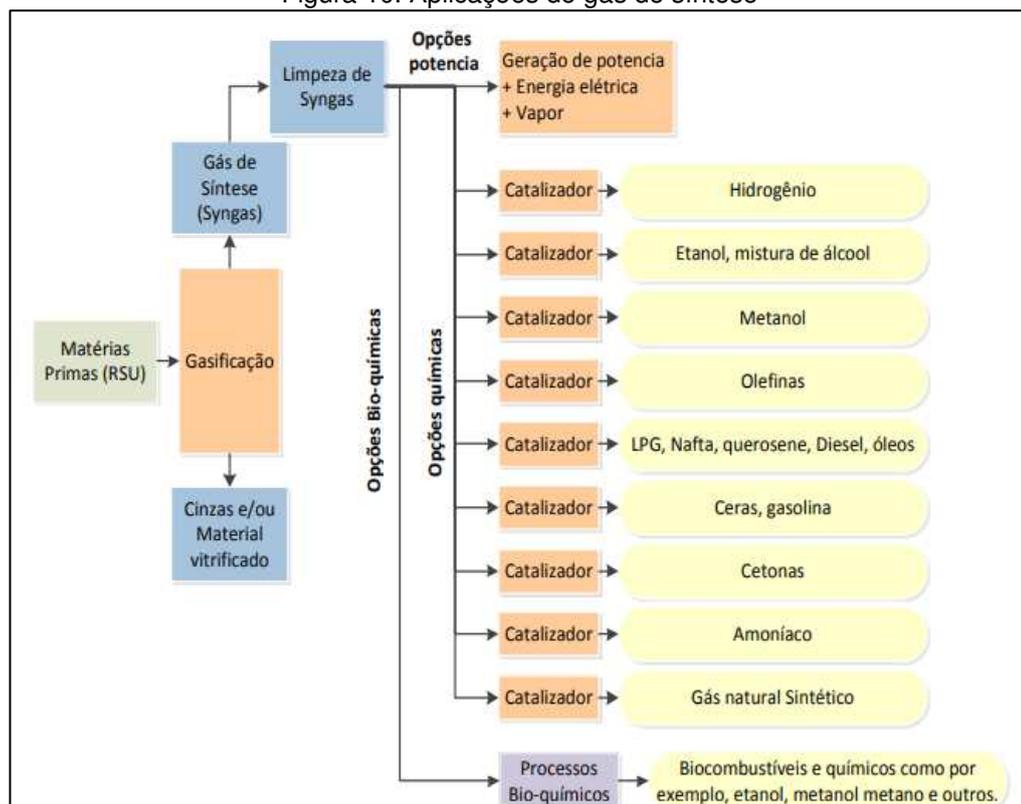
De acordo com Belgiorno et al. (2003) a faixa de composição do gás de síntese produzido no processo de gaseificação é de (18-20) % H₂, (18-21) % CO, (2- 3) % CH₄, (8-10) % CO₂, e o restante é N₂. De acordo com Sanchez (2010) dentre os gases citados na composição do gás de síntese, os de maior interesse são o CO, H₂ e o CH₄.

Uma varável de grande influência na composição do produto da gaseificação, além das já mencionadas, é a temperatura. Basu (2013) destaca que na gaseificação a baixa temperatura (temperatura inferior 1000 °C) o gás obtido apresenta maior

composição de hidrocarbonetos de cadeia maior em relação ao gás obtido no processo com temperaturas superiores. Já para a gaseificação a altas temperaturas (temperaturas superiores a 1200 °C) obtém-se como principais produtos o hidrogênio e o monóxido de carbono.

Na Figura 10 é possível observar as aplicações do gás de síntese. Considerando a gama de aplicabilidades e rotas químicas torna-se evidente quão promissor é o processo de gaseificação no que se refere a valorização da matéria-prima. Dessa forma, pode-se inferir que, a partir do processo de gaseificação é possível um gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos associado a uma recuperação energética com grande potencial econômico além de ser uma alternativa ambientalmente adequada visto que elimina os resíduos do meio ambiente sem prejuízos a saúde pública.

Figura 10. Aplicações do gás de síntese



Fonte: NÁSNER (2015)

Lora et al. (2012) ressalta a diversidade na aplicação do gás de síntese, pois existe grande disponibilidade e flexibilidade para seu uso atualmente e futuramente, além disto, o gás de síntese pode apresenta aplicações como um todo e também de forma isolada no que se refere a seus componentes.

Diante do exposto evidencia-se quão promissor é o processo de gaseificação dado que o mesmo produz um combustível em potencial que pode ser utilizado na produção de energia, combustíveis, hidrogênio e diversos produtos químicos.

2.7. GERAÇÃO DE POTÊNCIA

Entre as inúmeras aplicações do gás de síntese, destaca-se, para a presente pesquisa, a geração de potência. Existem várias tecnologias que permitem gerar potência a partir do gás de síntese, entretanto, segundo Baratieri (2009) os motores de combustão interna se destacam devido a seu baixo custo e disponibilidade.

2.7.1. Motores De Combustão Interna (MCI)

Define-se motor como uma máquina designada para a conversão de qualquer forma de energia em energia mecânica, dessa forma, um motor de combustão é uma máquina que transforma energia térmica proveniente da reação de combustão em trabalho mecânico. A combustão que ocorre nesses tipos de motores pode ser externa, a exemplo das máquinas a vapor, ou interna, como no caso do ciclo Otto e ciclo diesel.

Os motores de combustão interna (MCI) são aqueles nos quais a combustão acontece em seu interior. Mesquita e Menezes (2017) definem motores de combustão interna como motores empregados para a geração de trabalho mecânico a partir dos produtos provenientes da reação de combustão como fluido de trabalho. Pode-se ainda dizer que um motor de combustão interna é uma máquina termodinâmica, visto que, o termo termodinâmica significa força proveniente do calor.

O MCI é um mecanismo composto por biela, virabrequim e pistão, este último é o responsável pela conversão da energia térmica em trabalho mecânico. De acordo com Salazar (1998) o trabalho mecânico que é gerado a partir do movimento do pistão aciona o veio rotativo e dessa forma gera energia. Násner (2015) descreve o princípio básico de um motor de combustão interna, segundo o mesmo o MCI funciona em quatro etapas:

- Etapa 1 – Admissão: Nessa etapa o ar/combustível é aspirado a partir da válvula de admissão.

- Etapa 2 – Compressão: Após admissão a mistura ar/combustível é adiabaticamente comprimida e inflamada pela vela de ignição.
- Etapa 3 – Expansão: A mistura adiabática expande adiabaticamente o que impulsiona o pistão para a produção do trabalho mecânico útil.
- Etapa 4 – Descarga: São descarregados os gases de escape quentes pela válvula de escape e o ciclo reinicia.

Diversos tipos de combustíveis podem ser utilizados em um MCI, incluindo o combustível obtido a partir do processo de gaseificação, além deste, pode-se ainda utilizar, gás natural, biogás entre outros.

Os MCI são classificados em: Motores de ignição por centelha (Ciclo Otto) e Motores de ignição por compressão (Ciclo Diesel) (VITÓRIA, 2017). O interesse do presente trabalho concentra-se nos motores de ignição por centelha denominado ainda motor ciclo Otto.

2.7.1.1 Ciclo Otto

O funcionamento de um MCI com pistão atua com uma mistura de ar/combustível no cilindro de serviço (BOSCH, 2005). Na Figura 11 é possível observar um esquema do funcionamento básico de um motor de ignição por centelha, ou motor de ciclo Otto.

Assim como é possível observar na figura 11 o funcionamento do MCI passa por fases, as quais, de acordo com Dias (2009) e Malfatti (2009) são: Admissão, compressão, combustão e explosão, expansão e descarga, cada fase é descrita a seguir de acordo com os autores supracitados.

Figura 11. Esquema do funcionamento de um MCI com pistão



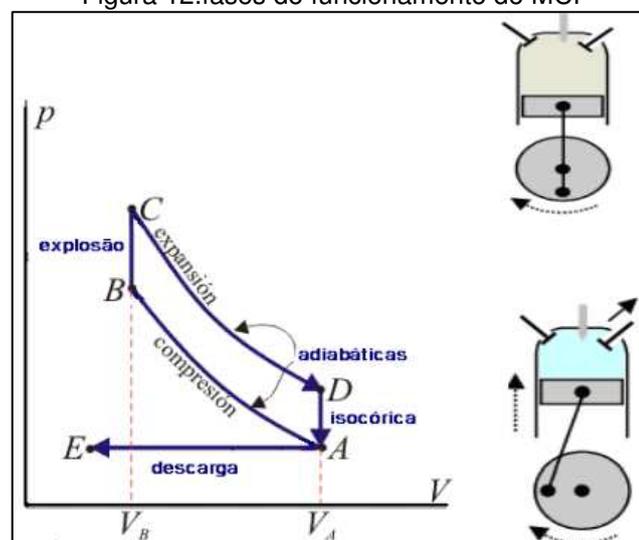
Fonte: DIAS (2009)

A primeira fase é a admissão, nessa etapa, a diferença de pressão existente entre o sistema de admissão e a pressão atmosférica exterior aspira a mistura ar/combustível para dentro do cilindro. Na segunda etapa (compressão), a mistura é comprimida e conseqüentemente eleva a pressão e a temperatura no interior do cilindro.

Na terceira fase ocorre a combustão e explosão. Quando se aproxima do final da compressão a vela de ignição proporciona a centelha iniciando a combustão da mistura. A combustão acontece próximo ao ponto médio superior, ela inicia ao final da compressão e termina no início da expansão.

A quarta etapa é a expansão, nessa fase, o calor proveniente da combustão eleva a temperatura e pressão do cilindro, como as válvulas estão fechadas, a alta pressão criada pela compressão empurra o pistão até o ponto morto inferior e produz o trabalho do ciclo do motor e conseqüentemente diminui a pressão e temperatura no interior do cilindro. Por fim, na quinta e última etapa ocorre a descarga. A Figura 12 ilustra as fases do funcionamento de um MCI.

Figura 12. fases do funcionamento do MCI



Fonte: DIAS (2009)

Quando o pistão chega ao ponto médio inferior, como a válvula de escape estará aberta e o pistão desloca-se do ponto médio inferior para o ponto médio superior, a maioria dos gases provenientes da combustão ainda remanescentes no cilindro é liberada e o ciclo é reiniciado.

2.8. CONCLUSÃO

A partir do presente capítulo é possível observar, com base na gama de temas abordados, a grande abrangência da pesquisa, a qual inclui importantes discussões do meio acadêmico, englobando, além dos resíduos sólidos e o tratamento adequado dos mesmos, a sustentabilidades, crise energética, energias renováveis e novas tecnologias emergentes no que se refere a conversão energética dos RSU. Nessa perspectiva, o presente embasamento teórico, além de ser base para a compreensão da pesquisa auxilia a entender sua importância e contribuição.

2.9. REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 1987.

ANJOS, Albert Reis dos. **Obtenção de gases combustíveis via transformação termoquímica de Eucalyptus Grandis em reator de leito fluidizado**. 2017. Acesso em 01 Dez. 2021. Disponível em < <https://repositorio.unb.br/handle/10482/23333> >

ANSAH, E. **Experimental Investigation And Aspen Plus Simulation Of The Msw Pyrolysis Process**. Tese (doutorado em engenharia química). Universidade Estadual Técnica e Agrícola da Carolina do Norte. Greensboro, Carolina do Norte, 2013. Acesso em 10 de Dez. 2021. Disponível em < <https://digital.library.ncat.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1103&context=theses> >

ARAFAT, Hassan A.; JIJAKLI, Kenan.; AHSAN, Amimul. **Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment**. Journal of Cleaner Production, 2015. v. 105, p. 233–240. Acesso em: 28 de Dez. 2021. Disponível em < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613008470?casa_token=Ggli7jycAdEAAAAA:31KrXXRdgCD-Pcj2a4vqqG0ddJlmNZRB9t5eLkZgPdkNxMpoerzr7c-hjSj99-S6XmhPJ_h3_Jw >

AMBIENTE, M. D. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, Brasília, Agosto, 2012. Acesso em 12 Nov. 2020. Disponível em < [https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos diversos do portal/PNRS Revisao Decreto 280812.pdf](https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos%20diversos%20do%20portal/PNRS%20Revisao%20Decreto%20280812.pdf) >

ARAÚJO, R. M. da S. **Estudo comparativo de processos de gaseificação de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Dissertação (Mestrado em ciências). Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo. 2016. Acesso em 12 Out. 2021. Disponível em < <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-04012017-105154/publico/RamiresMenezesdaSilvaAraujoCorr16.pdf> >

AL-SALEM, S. M.; LETTIERI, P. & BAEYENS, J. **The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals**. Progress in Energy and Combustion Science. volume 36, páginas 103-129, Fevereiro, 2010. Acesso em 11 Nov. 2021. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128509000446> >

BEN. Balanço energético Nacional. 2020. Empresa de pesquisa energética. Relatório síntese, ano base: 2019. Rio de Janeiro, 2020. Acesso em 14 de Nov. 2020.

Disponível em < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf >

BARATIERI. M; BAGGIO. P; BOSIO. B; GRIGIANTE.M; LONGO; G.A. **The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: A comparative analysis.** *Applied Thermal Engineering*, 2009. Acesso em 21 Dez. 2021. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431109001446?casa_token=6bVtujjwxo8AAAAA:Xtfp2WosdDZAUqPFOqvPdIMESn5rbysYjA4-EEf60xKxjeT8FtzJ6z7iVG-8czUw_nYAlexKG9jU>

BASU, Prabir. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory.** Burlington: Ed. Elsevier, 2010. Acesso em 25 Mar 2021. . Disponível em <<https://www.elsevier.com/books/biomass-gasification-and-pyrolysis/basu/978-0-12-374988-8> >

BOSCH, Robert; **Manual de Tecnologia Automotiva**; Tradução da 25ª edição alemã; 2005. Acesso em 25 Mai. 2020. Disponível em <https://issuu.com/editorablucher/docs/issuu_manual_automotiva_isbn8521203780 >

BRAIDO, R. S, **Pirólise De Resinas Dentárias À Base De Poli(Metacrilato De Metila).** Dissertação de mestrado, UFRJ, 2014. Acesso em 11 Nov. 2021. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/319654958_ESTUDO_DA_PIROLISE_DE_RESINAS_DENTARIAS_A_BASE_DE_POLIMETACRILATO_DE_METILA >

BELGIORNO, V. et al. **Energy from gasification of solid wastes.** *Waste Management*, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2003. Acesso em 11 Nov. 2021. Disponível em <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12623097/#:~:text=Gasification%20technology%20is%20by%20no,thermal%20treatment%20of%20solid%20waste.> >

CROTTI, B. F. **Estudo da pirólise de polipropileno para produção de óleo.** 2018. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018. Acesso em 12 de Nov. 2021. Disponível em <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12115>>

CARMONA, B. de S; KASSAI, J. R. **A matriz energética brasileira: uma análise perante a NDC e o ODS7.** XIX USP International conference is accounting. São Paulo, junho de 2019. Acesso em: 1 de jun 2021. Disponível em <<https://congressosp.fipecafi.org/anais/19Usplnternational/ArtigosDownload/1751.pdf> >

CRUZ, Juliana Cunha da; **Evolução tecnológica das rotas de gaseificação e pirólise de materiais lignocelulósicos: um estudo bibliométrico.** Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2012. Acesso em 24 de Abr 2020. Disponível em <<http://objdig.ufrj.br/61/dissert/793949.pdf> >

COUTO, N. et al. **Exergy analysis of Portuguese municipal solid waste treatment via steam gasification.** Energy Conversion and Management, 2017. v. 134, p. 235–246. Acesso em 11 Dez. 2020. Disponível em <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689041631127X> >

COSTA, P. A. da C. **Produção de hidrocarboneto líquidos e gasosos por pirólise de resíduos plásticos. Tese (Doutorado em engenharia química).** Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de ciências e tecnologia, Lisboa, 2006. Acesso em 20 Nov. 2021. <Disponível em <https://docero.com.br/doc/s5588xs>>

DEMIRBAŞ, A. **Yields of oil products from thermochemical biomass conversion processes.** Energy Conversion and Management, 1998. Acesso em 12 Nov 2021. Disponível em <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890497000472>>

DIAS, J. L. G. **Ciclo de Otto: aplicação teórica e utilidade prática.** Mestrado Profissional em Ensino de Física / Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. Acesso em 12 de Nov 2021. Disponível em <
<https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/cicloottoartigofinal.pdf> >

ERTAŞ, M. & MEHMET, Hakkı Alma. **Pyrolysis of laurel (Laurus nobilis L.) extraction residues in a fixed-bed reactor: Characterization of bio-oil and bio-char.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010. Acesso em 10 Nov 2021. Disponível em <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237010000173> >

FAO. Food Agriculture Organization. **Food losses and waste in the context of sustainable food systems. A report by the high level panel of experts on food security and nutrition,** june 2014. Acesso em: 15 de Dez. 2021. Disponível em: <
http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/hlpe/hlpe_documents/HLPE_Reports/HLPE-Report8_EN.pdf >.

GARCIA, ADRIANA; MENDONÇA, MARCELO APARECIDO. **Bio-óleo de resíduos sólidos obtido via pirólise: análise dos parâmetros físico-químicos.** Brazilian Applied Science Review. v. 2, n. 5, p. 1632-1635, Curitiba. 2018. Acesso em 02 de Fev. 2021. Disponível em <
<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/view/550/473>>

GUAMÁ, F., COSTA, R. D. A., ROCHA, H. L., ISENSEE, F. V., & FUTURO, L. L. **Lixo plástico: de sua produção até a madeira plástica.** In: Encontro Nacional De Engenharia De Produção, 28., 2008, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. Acesso em 1 Nov. 2020. Disponível em <
http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_077_542_11394.pdf >

GIL, J., CORELLA, J., AZNAR, M. A. P. & CABALLERO, M. A. **Biomass Gasification in Atmospheric and Bubbling Fluidized Bed: Effect of the Type of Gasifying Agent on the Product Distribution.** Biomass and Bioenergy, v. 17, n. 5, p. 389-

403, 1999. Acesso em 20 de Fev 2021. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953499000550> >

GODECKE, M. V., NAIME, R. H., FIGUEIREDO, J. A. S. **O consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. V(8), n.8, p.1700-1712. 2012. Acesso em: 14 Nov 2021. Disponível em < <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/6380/pdf>>

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. **Production, use, and fate of all plastics ever 64 made**. Science advances, v. 3, n. 7, 2017. Acesso em 12 de Nov. 2021. Disponível em < <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28776036/>>

HOORNWEG, D.; BHADA, P. What a Waste. **A Global Review of Solid Waste Management. Urban development series knowledge papers**, v. 281, n. 19, p. 44 2012. Acesso em : 12 Nov 2020. Disponível em < <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>>

JÚNIOR, H. A. **Pirólise de misturas plásticas**. 2017. 126f. Dissertação (Doutorado em engenharia química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Acesso em 5 de Fev. 2021. Disponível em < <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/2017/488--64/file>>

KHURIATI, AINIE; PURWANTO, PURWANTO; HUBOYO, HARYONO SETIYO; SURYONO, SURYONO; PUTRO, ARI BAWONO. **Application of aspen plus for municipal solid waste plasma gasification simulation: case study of Jatibarang Landfill in Semarang Indonesia**. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018. Acesso em: 12 Nov 2021. Disponível em <[Application of aspen plus for municipal solid waste plasma gasification simulation: case study of Jatibarang Landfill in Semarang Indonesia - IOPscience](#)>

LORA, ELECTO; ANDRADE, RUBENILDO VIEIRA; ÁNGEL, JUAN DANIEL MARTÍNEZ; LEITE, MARCO ANTÔNIO HAIKAL; ROCHA, MATEUS HENRIQUE; SALES, CRISTINA AP^a. VILAS BÔAS DE; MENDOZA, MÓNICA ANDREA GUALDRÓN; CORAL, DORIS DEL SOCORRO OBANDO. **Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. *Biocombustíveis. Interciência*, 1, 411-498, 2012. Acesso em 21 de Nov. 2021. Disponível em < https://www.researchgate.net/publication/284163742_Gaseificacao_e_pirólise_para_a_conversao_da_biomassa_em_eletricidade_e_biocombustiveis >

LISBOA, FÁBIO CORDEIRO de; **Carbonização e Gaseificação de Resíduos da Macaúba, Tucumã e Cupuaçu para Geração de Eletricidade**. Tese (Doutorado em Engenharia mecânica). Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2016. Acesso em 21 Nov. 2021. Disponível em <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/21026/1/2016_F%C3%A1bioCordeirodeLisboa.pdf>

LAZZAROTTO, PEDRO IVAN; JUNGES, JANAÍNA; FERREIRA, SUELEM; MANERA, CHRISTIAN. **Avaliação do potencial energético do gás obtido a partir da gaseificação da fração polimérica contida no rejeito (fpr) da triagem de resíduos sólidos urbanos (RSU)**. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo – SP, 2018. Acesso em 5 de Mar. 2021. Disponível em <[\(PDF\) AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO GÁS OBTIDO A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DA FRAÇÃO POLIMÉRICA CONTIDA NO REJEITO \(FPR\) DA TRIAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS \(RSU\) \(researchgate.net\)](#)>

MIRANDA, D. M. V. DE. **Degradação Térmica E Catalítica Dos Polímeros Poli(Acrilonitrila-Co-Butadieno-Co-Estireno) (Abs) E Poliestireno De Alto Impacto (Hips) Oriundos De Resíduos Eletroeletrônicos**. 2016. 212 f. Instituto Alberto Luiz Coimbra de PósGraduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE/UFRJ), 2016. Acesso em Acesso em 25 Mar 2021. Disponível em <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7425/1/871420.pdf> >

MANO, E. B.; MENDES, L. Introdução a polímeros. 2. ed. Rio de Janeiro/Brasil: Edgard Blucher, 1999.

MENDOZA, FAYNA RODRÍGUEZ. **Simulación de un Proceso de Pirólisis de Plásticos empleando ASPEN – HYSYS**. Graduação em Engenharia química industrial. Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria, 2015. Acesso em 20 Out 2020. Disponível em <<https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/105898/2/Rodr%C3%ADguez%20Mendoza%2C%20Fayna.pdf> >

MESQUITA, GABRIEL BISCTRIZAN DE; MENEZES, JAKSON VIEIRA. **Gaseificação De Biomassa Fecal Humana: Análise Do Processo Via Aspen Plus E Estudo Do Gás De Síntese Como Combustível Em Um Motor De Combustão Interna**. Projeto De Graduação (Graduação em engenharia química). Universidade Federal do Espírito Santos. Vitória, 2017. Acesso em 01 de Out. 2021. Disponível em <https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/18_pg_gabriel_jakson_final.pdf >

MAVROTAS, G; SKOULAXINO, S; GAKIS, N; KATSOUROS, V; GEORGOPOULOU, E. **“A multiobjective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management.”** Waste management (New York, N.Y.), vol. 33, no. 9, pp. 1934–49, Sep. 2013. Acesso em 12 Nov. 2020. Disponível em <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23751513/> >

MATERAZZI, M., LETTIERI, P., MAZZEI, L., TAYLOR, R., & CHAPMAN, C. **Thermodynamic modelling and evaluation of two-stage thermal process for waste gasification**. Fuel, London, v. 108, p. 2-4, June 2013. Acesso em 13 de Mar 2021. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113001397>>

NÁSNER, A. M. L. **Modelagem de uma Planta Piloto de Gaseificação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) em um Sistema Integrado a Motor Ciclo Otto, Utilizando o Software Aspen Plus™**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Energia). Itajuba, Minas Gerais, 2015. Acesso em 1 de Out. 2021. Disponível em < <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/474>>

NEATHERY, J. **Thermal Conversion of Biomassa to Liquids Fuels and Chemicals**. Lexington: ESC Publisher, 2010. Acesso em 29 Dez. 2021. Disponível em <<https://pubs.rsc.org/en/content/chapter/bk9781849730358-00067/978-1-84973-035-8>>

NASCIMENTO, T.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. **Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil**. Cadernos EBAPE. BR, v. 10, n. 3,, 2012. Acesso em 20 Mar 2021. Disponível em <<https://www.scielo.br/j/cebape/a/QMWwLZbx6pFdDT9DP8NWkZh/abstract/?lang=pt>>

Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. ABRELPE, 2017. Acesso em 25 Abr 2021. Disponível em < https://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf >

PARADELA, F. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos plásticos e de biomassa**. Tese de M.Sc., Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal., 2007. Acesso em 25 Abr 2021. Disponível em < <https://run.unl.pt/handle/10362/9060> >

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió. EDUFAL, 2005. Acesso em: 4 Fev. 2021. Disponível em < <https://pt.scribd.com/document/291260828/Plasticos-Caracteristicas-Usos-Producao-e-Impactos-Ambientais>>

PNRS. Plano nacional de resíduos sólidos. Ministério do Meio ambiente, Brasília, 2012. Acesso em: 12 Mar. 2021. Disponível em <https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf>

RADLEIN, D. "The past and future of fast pyrolysis for the production of bio-oil." **Symposium on thermal and catalytic sciences for biofuels and biobased products**. USA. 2010.

PATROCÍNIO, F. J. G. **Simulação em Aspen Plus® de processos de valorização de biomassa**. Dissertação (Mestrado em engenharia química). Técnico Lisboa. Instituto Superior Técnico. Portugal, 2017. Acesso em 12 de Mar. 2021. Disponível em: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997258415/DISSERTACAO_Francisco%20Patrocinio%2067971.pdf

Renewable Energy Investment, 2004 to 2015. Our World in Data, 2017. Acesso em 03 Abr. 2021. Disponível em < <https://ourworldindata.org/grapher/renewable-energy-investment> >

REB. Resenha energética brasileira. **Oferta e demanda de energia, instalações energéticas, energia no mundo**. Ministério de Minas e Engenharia. Secretaria de desenvolvimento e planejamento energético, 2021. Acesso em: 14 Nov. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ResenhaEnergicaExercicio2020final.pdf>

RODRIGUES, VITOR ET AL. **Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Produção de Energia: Análise de Legislação para Viabilidade Econômica de Soluções Conjuntas**. XI Simpósio de excelência em gestão e tecnologia. Resende-RJ, 2014. Acesso em 15 Fev. 2022. Disponível em < <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos14/43220492.pdf> >

SILVA, A; SILVA, E. **Conhecendo Materiais Poliméricos**. Universidade Federal de Mato Grosso. Instituto de Ciências Exatas e da Terra – Departamento de Física. Mato Grosso, 2003. Acesso em: 21 Mar. 2021. Disponível em < <http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/ea000223.pdf> >

SILVA, HUGO DANIEL FREITAS DA; **Dimensionamento de um reator piloto para pirólise de biomassa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal, 2016. Acesso em 02 de Out. 2021. Disponível em https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/10984/1/DM_HugoSilva_2016_MEQ.pdf <

SILVA LORA, ELECTO EDUARDO. **Gaseificação de biomassa. Workshop de Tecnologia (BTL)**. NEST/INIFEI, São Paulo 2008. Acesso em: 12 de Out. 2021. Disponível em < <https://www.yumpu.com/pt/document/read/12871568/workshop-de-tecnologias-btl-biomassa-to-liquid-apta>>

SALAZAR, FERNANDO. **Internal combustion engines**, 1998. Acesso em 12 Dez. 2021. Disponível em < <https://silo.tips/download/2-187> >
SCHEIRS, JOHN; KAMINSKY, Walter (Org.) **Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastic: Converting Waste Plastic into Diesel and Other Fuel**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2006. Acesso em 12 Fev 2021. Disponível em < https://www.academia.edu/8526337/Feedstock_Recycling_and_Pyrolysis_of_Waste_Plastics_Converting_Waste_Plastics_into_Diesel_and_Other_Fuels >

SIEDLECKI M, DE JONG W. **Biomass gasification as the first hot step in clean syngas production process – gas quality optimization and primary tar reduction measures in a 100 kW thermal input steam–oxygen blown CFB gasifier**. Biomass Bioenergy. p.S240-S62, 2011. Acesso em 12 Mai. 2021. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953411003242> >

SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. S. **A tecnologia da reciclagem dos polímeros**. Química nova, v.28, p. 65-72, 2005. Acesso em 11 Nov. 2020. Disponível em < <https://www.scielo.br/j/qn/a/bTLkNHWGnpsj4SWWjgLB49L/?lang=pt> >

SAIOTE, R. M. L. **Estudo da pirólise catalítica dos resíduos plásticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da energia do meio ambiente). Universidade De Lisboa.

Portugal, 2012. Acesso em 12 fev 2020. Disponível em < <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/9062>>

SANTOS, R. M. dos; RODRIGUES, M. de S; CARNIELLO, M. F. **Energia E Sustentabilidade: Panorama Da Matriz Energética Brasileira**. Revista Scientia, Salvador, v. 6, n. 1, p. 13-33, 2021. Acesso em: 12 de Mar. 2021. Disponível em <<https://www.google.com.br/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.revistas.uneb.br%2Findex.php%2Fscientia%2Farticle%2Fview%2F9396%2F7456&psig=AOvVaw2CxE5v2fasBu1Jqe-UL-N&ust=1637016810327000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0Q3YkBahcKEwj43on--Jj0AhUAAAAAHQAAAAAQAw>>

ŞENSÖZ, SEVGI, DEMIRAL, ILKANUR., FERDI GERÇEL, Hasan. **Olive bagasse (Olea europea L.) pyrolysis**. *Bioresource Technology* 97, p.429–436. 2006. Acesso em 05 de Abr. 2021. Disponível em < <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16216727/>>

SIKARWAR, V. S. et al. **Progress in biofuel production from gasification**. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017. v. 61, p. 189–248. Acesso em 11 Nov. 2021. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036012851630106X> >

TOLMASQUIM, M. T. GUERREIRO, A.; GORINI, R. **Matriz energética brasileira, uma prospectiva**. *Novos estudos*. Nov, 2007. Acesso em: 14 Nov 2021. Disponível em < <https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000300003>>

VÉLEZ, D. C. P. **Bio-Óleo De Pirólise Rápida Como Precursor De Fibra De Carbono**. 79. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2017. Acesso em 25 Mar 2021. Disponível em < <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/49573> >

VAN SWAAIJ, W.; KERSTEN, S.; VAN DEN AARSEN, F. **Routes for Metanol from biomass**, Int 2-day Business Conference on Sustainable Industrial Developments, Delfzijl, Netherlands, April, 2004.

Zheng, J., et al., **Pyrolysis characteristics of organic components of municipal solid waste at high heating rates**. *Waste Management*, 2009. Acesso em 12 Nov 2021. Disponível em < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08002444?casa_token=L40UCUT4Wh4AAAAA:UihXAMuJ_AFiSRQmfV7gOi3PDF31glagsapgoLGotAH_qFlc-L_z_xUFaqJ_snbwyf-TyGovFe0 >

CAPÍTULO 3 | ESTADO DA ARTE

No estado da arte do presente trabalho a abordagem científica foi realizada a partir dos seguintes tópicos: Pirólise dos RSU e poliméricos, gaseificação dos RSU, pirólise e gaseificação: Aspen Hysys e Aspen Plus.

Considerando o grande potencial dos resíduos sólidos, a gestão e destinação final dos mesmos e ainda o grande potencial do produto líquido obtido a partir do referido processo Garcia e Mendonça (2018) realizaram análises físico-químicas no óleo de pirólise obtido a partir da pirólise de resíduos sólidos com a finalidade de propor a sua utilização para fins energéticos.

Em sua pesquisa Garcia e Mendonça (2018) realizaram o processo de pirólise de RSU em um reator e aço inox com leito fixo a 500 °C. Realizou-se a pirólise de restos de alimentos, de Poliestireno (PS) e papel, de misturas binárias (Papel e Poliestireno; Poliestireno e Sobras de alimentos; Papel e Sobras de alimentos) e ternárias (papel, Poliestireno e sobras de alimentos), para que dessa forma fosse possível simular a pirólise das diferentes frações dos resíduos urbanos.

A viscosidade cinemática e teor de enxofre dos óleos obtidos foram, em média 1,34 mm²·s⁻¹, 0,20% m/m respectivamente, tais valores estão dentro dos limites estabelecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para óleos combustíveis em turbinas geradoras de energia elétrica, visto que, de acordo com a mesma, a viscosidade cinemática precisa estar entre 1,6 mm²·s⁻¹ e 6,0 mm²·s⁻¹ (40 °C), e teor de enxofre menor que 1 %.

No que se refere ao poder calorífico superior (PCS), observou-se semelhança desse parâmetro com combustíveis convencionais, visto que as misturas ternárias apresentaram PCS médio igual a 43,0 MJ · kg⁻¹ e o diesel apresenta PCS em média igual a 43,0 MJ · kg⁻¹. Para todas as amostras o valor médio do PCS foi 37,2 MJ·kg⁻¹.

Constatou-se também a influência do composto que foi aplicado o processo de pirólise no poder calorífico do óleo obtido, que em ordem decrescente no que se refere ao poder calorífico foi: papel + poliestireno, papel + poliestireno + sobras de alimentos e papel + sobras de alimentos, entretanto, para todas as matérias-primas, o óleo de pirólise apresentou valor de poder calorífico semelhante.

A questão ambiental e escassez dos recursos fósseis têm intensificado a busca por combustíveis alternativos, aliado a isto, a poluição proveniente dos resíduos plásticos desperta um interesse em especial em pesquisas no meio acadêmico

utilizando fortemente a pirólise como uma forma de reciclagem e alternativamente seu produto (o óleo de pirólise) na produção de combustíveis.

Nesse contexto, Tulashie, Boadu e Dapaah (2019) realizaram a pirólise de resíduos plásticos pós uso, com a finalidade de demonstrar a eficácia de tal processo na reciclagem dos mesmos, uma vez que, além de transformar o lixo plástico em um recurso, contribui reduzindo os impactos ambientais causados por esse material quando descartados inadequadamente.

Para desenvolvimento de sua pesquisa, os autores supracitados coletaram resíduos plásticos provenientes do córrego da Universidade de Cape Coast, Gana. Nos resíduos coletados existia uma gama de variedades de polímeros como garrafas, tampas, canudos, recipientes, pratos de plásticos, etc.

A pirólise dos resíduos foi realizada em um reator de leito fixo a 350 °C com fluxo de nitrogênio gasoso de 200 mL/min por 2 h 40 min de tempo de craqueamento. O óleo obtido a partir do processo de pirólise dos resíduos plásticos foi analisado por vários métodos analíticos, como a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (*FTIR*), a cromatografia gasosa com espectrômetro de massa (GC-MS) e viscosidade cinemática.

Os resultados apresentados por Tulashie, Boadu e Dapaah (2019) através da análise por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier revelam que o óleo de pirólise por eles produzidos é constituído por 21 grupos funcionais, uma mistura de grupos alifáticos e aromáticos sendo os compostos alifáticos os mais abundantes.

Os resultados obtidos na cromatografia gasosa com espectrômetro de massa mostram que o óleo combustível contém substâncias que estão dentro da faixa de gasóleo, o álcool bênio é o composto com o pico mais alto. A viscosidade cinemática do óleo bruto foi de 1,036 mm² s⁻¹, tal propriedade diminui com o aumento da temperatura.

Diante dos resultados obtidos pode-se constatar a eficácia do processo de pirólise na reciclagem dos resíduos plásticos, além disto o estudo constatou o alto potencial do óleo combustível, uma vez que as propriedades analisadas se assemelharam a do diesel, entretanto são necessárias mais investigações das características do óleo de pirólise, como a análise da densidade, resíduo de carbono, ponto de fluidez e demais fatores importantes para óleos combustíveis.

Outra pesquisa relevante no tocante a obtenção do óleo de pirólise a partir da pirólise de resíduos plásticos e sua utilização como combustível alternativo, é o estudo desenvolvido por Khan et al. (2016). Em sua pesquisa intitulada *“Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend: Fuel Characterization”* os autores supracitados realizaram em um reator (de aço inoxidável) de leito fixo a pirólise de resíduos plásticos, produzindo assim, o óleo de pirólise, que foi caracterizado e analisado.

Na referida pesquisa foi realizada ainda a comparação do óleo de pirólise com combustíveis já comercializados, como o diesel, gasolina, dentre outros. A pirólise dos resíduos foi realizada entre 330 °C e 490 °C durante um período de duas a três horas, e o produto de interesse foi a fração líquida.

Ao desenvolver a pesquisa, Khan et al. (2016) constataram a influência da temperatura na fração de óleo obtida, uma vez que a 330 °C obteve-se cerca de 38,5% da fração líquida à 425 °C obteve-se em média 76,0%. Assim observa-se que maiores temperaturas produzem maior quantidade de óleo de pirólise.

Ao comparar as características do óleo de pirólise obtido por Khan et al. (2016) com a de combustíveis usuais, pode-se verificar que a viscosidade do óleo com pirólise realizada a 400 °C foi de 1,98 cSt, sendo maior que o querosene e menor do que o diesel. A densidade do óleo de pirólise assemelha-se a densidade do querosene e do diesel.

O ponto de inflamação do óleo de pirólise, propriedade relacionada aos riscos de incêndio foi menos elevado em comparação ao diesel e querosene, entretanto, é possível através de remoção de componentes mais leves, tais como a nafta/gasolina, otimizar esta propriedade do óleo de pirólise.

O ponto de combustão foi 20 °C e o ponto de fluidez foi menor que 15 °C o que indica que o óleo não é adequado para ser utilizado como combustível em locais frios.

Já o resíduo de carbono do óleo de pirólise foi de 0,5%, o qual foi menor que do diesel e óleo combustível. O resíduo de carbono indica a tendência que o óleo tem para depositar resíduos de carbono sólido na superfície quente, desta forma um combustível que deposite menos resíduos é preferível.

Diante os resultados obtidos por Khan et al. (2016) evidencia-se o potencial do óleo de pirólise no tocante ao seu uso como combustível, dado que suas propriedades, em sua maioria, foram similares a de combustíveis usuais, entretanto, mais pesquisas devem ser realizadas de modo a otimizar algumas propriedades que distinguem das

que apresentam os combustíveis usuais como, por exemplo, o ponto de fluidez e de inflamação e até mesmo aperfeiçoar o processo de pirólise, estudando em quais condições e quais categorias de plástico resultaria em um óleo de pirólise de melhor qualidade.

Seguindo com a mesma linha de pesquisa Quesada et al. (2019) realizaram o processo de pirólise de resíduos plásticos (filme de polietileno), com o objetivo de obter a fração líquida e propô-la como combustível. A principal finalidade do trabalho dos autores supracitados foi determinar a qualidade do óleo obtido e se a mesma dependia das condições operacionais, de resíduos plásticos pós uso.

Após obtenção de 15 óleos de pirólise, foi realizada a caracterização física e química dos óleos obtidos. As propriedades físicas estudadas foram: pH, viscosidade, densidade e índice de cetano. Na caracterização química do óleo realizou-se a análise elemental, a termo gravimétrica de teor de água e resíduos de carbono, temperatura de ignição, calorimetria de varredura diferencial, análise por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourie, Cromatografia gasosa e espectrometria de massa.

Os resultados das propriedades dos óleos obtidos foram analisados e comparados com os combustíveis comerciais gasolina e gasóleo. De forma genérica, todas as amostras de óleo apresentaram propriedades físicas e químicas semelhantes. As propriedades físicas analisadas mostraram-se muito semelhantes às dos combustíveis comerciais, contudo, a viscosidade das amostras do óleo foi relativamente alta em comparação a do diesel e da gasolina e mais semelhante ao do petróleo bruto. Em relação às propriedades químicas, as técnicas de FTIR e GC-MS encontraram espectros de óleo praticamente idênticos.

Considerando a pirólise dos polímeros, os fatores que influencia na obtenção do produto final e suas respectivas frações, Songlacioglu, Ahmetli e Yel (2017) se propuseram a investigar a influência de algumas variáveis e de qual forma elas afetam o referido processo. Os fatores investigados foram: temperatura, preparação dos resíduos plásticos, fração do produto líquido (óleo de pirólise), conteúdo de hidrocarboneto (HC).

Na referida pesquisa, investigou-se ainda como o tipo de plástico pirolisado influencia no produto final, as categorias de plásticos investigados foram o Polietileno de alta densidade (HDPE), o Polietileno de baixa densidade (LDPE), o Polietileno tereftalato (PET), o Polipropileno (PP), o poliestireno (PS).

Para investigar a preparação dos resíduos plásticos, os mesmos foram triturados (<8 mm), e divididos em duas partes, uma das partes foi lavada e outra não. Ambas amostras (lavadas e não lavadas). As temperaturas de pirólise 300, 400, 500, 600 e 700 °C foram investigadas a uma taxa de aquecimento de 5 °C/ min.

Songlacioglu, Ahmetli e Yel (2017) observaram que o plástico utilizado no processo de pirólise influencia na fração de óleo obtida, além disto, para o HDPE e PP o rendimento do óleo de pirólise diminuiu com o aumento da temperatura, o mesmo não o correu com o LDPE e o PS, para esses polímeros não houve uma relação entre a temperatura e rendimento de óleo. No tocante as amostras lavadas, constatou-se que o rendimento de óleo dessas amostras foi menor, indicando assim que a conversão do produto gasoso foi maior nas amostras lavadas, com exceção do PP.

Os resíduos de plástico do tipo HDPE produziram o maior rendimento de óleo, enquanto o PET e o PP geraram o menor rendimento. O conteúdo HC nos óleos de pirólise foi fortemente afetado pelas temperaturas em que o processo acontece e pelo processo de lavagem sob condições idênticas de pirólise.

Os HCs mais altos foram produzidos na pirólise do HDPE. A pré-lavagem aumenta os valores de calor dos óleos de pirólise de HDPE e PP. Esse aumento foi menor para LDPE, PET, PS. A temperatura de pirólise quase não teve efeito nos valores de calor do óleo para PET lavado e PS não lavado. Para outras amostras de plástico, à medida que a temperatura aumentou, os valores de calor do óleo aumentaram. A análise estatística indicou que o efeito da pré-lavagem no valor do calor do óleo de pirólise é significativo para o HDPE e PP.

No estudo realizado por Songlacioglu, Ahmetli e Yel (2017) pode-se observar que a matéria-prima, mais especificamente o tipo de plástico utilizado no processo de pirólise, influência no resultado final, nesse sentido, considerando a pirólise e recuperação energética dos polímeros presentes nos RSU, os quais são uma mistura das mais diversas categorias de polímeros.

Singh et al. (2019) realizaram o estudo investigativo do processo de pirólise de uma mistura de plásticos com a intenção da recuperação energética dos mesmos. Os referidos autores investigaram ainda a temperatura de operação e sua influência no processo e produto final. Para desenvolvimento do estudo, realizaram a coleta de plásticos em diferentes locais em Durgapur (Bengala Ocidental), na Índia a fim de utilizá-los com matéria-prima, a qual foi submetida ao processo de pirólise em variadas temperaturas (450–550 °C).

Os resíduos utilizados constituem-se essencialmente de termoplásticos (como o PE), PP, PET e PS. Os resíduos foram submetidos ao processo de pirólise em um sistema constituídos por: reator de pirólise, condensador, unidade de coleta de líquido, câmara de resfriamento de gás e unidade de coleta de gás.

Os resultados obtidos por Singh et al. (2019) revelaram que a temperatura de 500 °C é uma temperatura ótima para o processo de pirólise dos resíduos poliméricos, dado que, essa temperatura permite um tempo ótimo para recuperação do volume máximo de óleo e com ausência de sólidos presentes.

O processo de pirólise realizado em diferentes temperaturas permitiu observar sua influência no processo, visto que, temperaturas mais elevadas favorecem a produção de gases enquanto diminuem o rendimento dos sólidos. Observou-se também que em temperaturas mais elevadas o óleo de pirólise obtido apresentava uma maior viscosidade.

Quanto ao produto final foi possível constatar o potencial do óleo de pirólise como um combustível alternativo, dado que, o mesmo apresentou propriedades e compostos semelhantes ao diesel. No tocante a fração gasosa, considerando seu PCI e sua constituição, o mesmo pode ser utilizado para produção de energia

Os resultados alcançados na pesquisa de Singh et al. (2019) permitem observar a grande influência da temperatura no processo de pirólise, o que impulsiona pesquisas no tocante a referida variável, entretanto, demais fatores, como pré-tratamento dos resíduos, tempo de residência entre outros também devem ser investigados. Constata-se também a eficiência da conversão dos resíduos poliméricos em produtos de alto valor agregado, visto que, tanto a fração líquida quanto a fração gasosa apresentaram, a partir de duas propriedades, grande potencial econômico.

A comunidade acadêmica vem desenvolvendo pesquisas no que se refere ao tratamento de resíduos sólidos utilizando também o processo da gaseificação

O foco ao utilizar o processo de gaseificação em resíduos é a obtenção do gás de síntese, dessa forma, o estudo do processo, de sua composição e potencial energético é de suma importância. Nesse sentido Lazzarotto et al. (2018) analisou o potencial energético do gás obtido do processo de gaseificação de resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos do município de Garibaldi -RS.

Lazzarotto et al. (2018) realizou a gaseificação dos resíduos poliméricos a 850 °C e utilizou vapor d'água como agente de gaseificação, além disto, foi utilizado

dolomita calcinada com a intenção de maximizar a produção de hidrogênio no gás de síntese.

Os resultados obtidos evidenciam a eficácia na conversão dos resíduos sólidos e recuperação energética dos mesmos visto que os autores supracitados obtiveram um gás rico em hidrogênio, aproximadamente 62 mol/kg de resíduo sólido. Ademais, os resultados possibilitam concluir uma produção significativa do produto final mesmo em pequenas massas de resíduos gaseificadas.

Em relação ao poder calorífico do gás obtido no processo, a alta concentração de hidrogênio favorece a referida variável, sendo o poder calorífico médio do gás obtido de 11,24 MJ/Nm³.

Vários fatores influenciam no processo de gaseificação e no gás de síntese obtido, nesse sentido, Zheng et al. (2016) realizaram o estudo experimental do processo de gaseificação do PE e do Bambu. Além disto variáveis importantes do processo foram analisadas, como por exemplo: razão de equivalência, temperatura de gaseificação, razão vapor/ matéria-prima e o poder calorífico inferior do gás obtido.

Para desenvolvimento da pesquisa os autores utilizaram um reator de leito fixo autoprotetado e dois tipos de agente de gaseificação, o ar e o vapor.

No que se refere aos resultados alcançados quanto a gaseificação do PE Zheng et al. (2016) constataram que o aumento da razão de equivalência acarreta em uma diminuição nos componentes do gás e em seu PCI, em contrapartida, ocorre um aumento do CO₂ na composição do gás.

Quanto a temperatura de gaseificação observou-se que temperaturas mais elevadas favorecem a produção de H₂ e CO na composição do gás de síntese e uma redução do CO₂. No tocante ao PCI do gás e a influência da temperatura verificou-se que temperaturas elevadas causam um aumento no PCI do gás e melhoram sua qualidade.

No que diz respeito a influência a influência da razão vapor/matéria-prima foi possível observar que o aumento dessa razão ocasiona uma redução no rendimento do CO e de CH₄, por outro lado, observou-se um aumento no rendimento de CO₂ e aumentou inicial de H₂, entretanto, à medida que se aumentava a razão vapor/matéria-prima o aumento de H₂ passou a ser superficial. No que diz respeito a relação entre razão vapor/biomassa e PCI, constatou-se que o aumento da referida razão diminuía o PCI do gás de síntese.

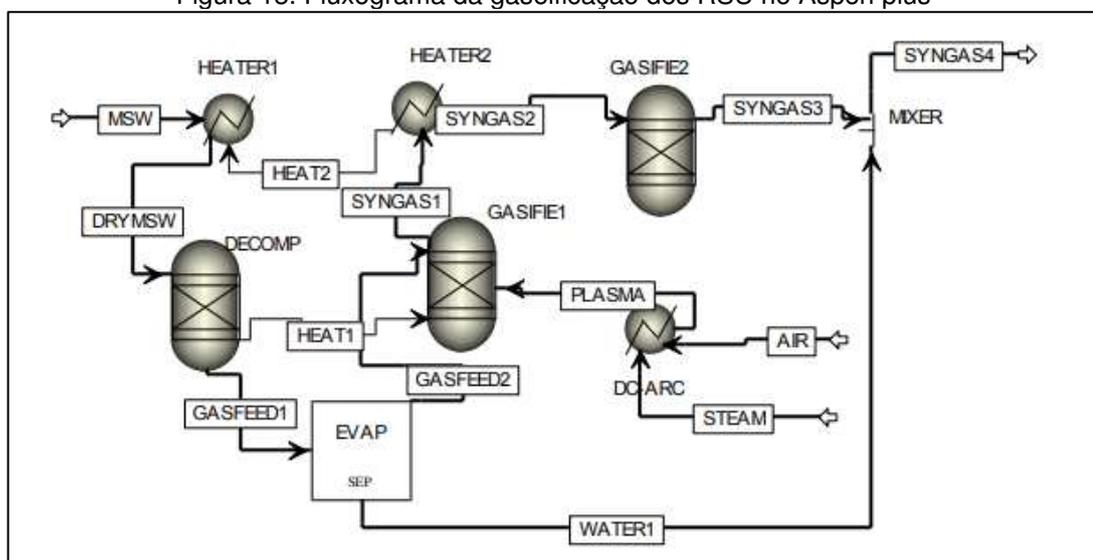
3.1 Aspen Hysys e Aspen Plus

A utilização de simuladores, a exemplo do Aspen Hysys e Aspen Plus, vêm sendo utilizados com a finalidade de prever condições ótimas de um determinado processo e principalmente com a intenção de analisar e prognosticar a viabilidade do mesmo. Nesse sentido as principais e contemporâneas pesquisas envolvendo os simuladores Aspen Hysys e Aspen Plus a fim de analisar e modelar processos de pirólise e gaseificação de resíduos sólidos urbanos e poliéricos são apresentadas e discutidas a seguir.

Khuriati et al. (2016) sugeriu o tratamento e reaproveitamento dos RSU a partir da tecnologia de gaseificação de plasma que consiste em uma oxidação térmica parcial na presença de um agente oxidante a altas temperaturas. Os autores realizaram um estudo de caso simulando o processo de gaseificação com os resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário de Jatibarang na província de Semarang, Idonésia.

Khuriati et al. (2016) realizaram a modelagem do processo no Aspen Plus que se baseou no modelo de minimização da energia livre de Gibbs. Na Figura 13 é possível observar o fluxograma da referida modelagem.

Figura 13. Fluxograma da gaseificação dos RSU no Aspen plus



Fonte: KHURIATI ET AL. (2016)

O modelo proposto é composto por três trocadores de calor, o HEATER 1 que tem o objetivo de simular uma unidade de secagem, O HEATER 2 utilizado para resfriar o gás de síntese proveniente do primeiro gaseificador (GASIFE1) e o DO-ARC que simula a tocha de plasma. Além dos trocadores de calor existe ainda uma unidade de pirólise (DECOMP) que converte a matéria-prima em produtos conhecidos (pois o

reator de equilíbrio (RGIBBS) não aceita componentes não convencionais) e dois gaseificadores que irão realizar a conversão da matéria-prima em gás de síntese.

Para validação do modelo proposto Khuriati et al. (2016) comparou os dados obtidos com dados experimentais e verificou que os mesmos eram semelhantes. No modelo simulado o referido autor obteve para 1kg de RSU por segundo uma média de 30% de H₂ e 27% de CO, comprovando dessa forma a eficiência do processo na obtenção do gás de síntese.

Na referida pesquisa também foi analisada a eficiência do gaseificador em relação ao agente de gaseificação utilizado no processo. Constatou-se que a utilização do ar produz um gás com maior concentração de CO, em contrapartida, a utilização de vapor como gás de plasma aumenta a concentração de hidrogênio no gás obtido e reduz a concentração de monóxido de carbono. Khuriati et al. (2016) verificou também uma relação proporcional entre quantidade de vapor injetado e de hidrogênio no gás obtido.

3.1 CONCLUSÃO

A partir do mapeamento dos principais trabalhos acadêmicos referentes a gaseificação e pirólise dos RSU, mais especificamente dos resíduos poliméricos, é possível avaliar como a temática da presente pesquisa tem sido abordada no meio acadêmico.

Identificam-se diversos trabalhos publicados no que se refere ao tratamento e recuperação de resíduos poliméricos a partir dos processos de pirólise e gaseificação. Muitas pesquisas estudam as condições do processo com a intenção de otimizá-las, analisam as características do produto obtido no referido processo ou ainda estudam seu potencial energético.

Entretanto estudos que analisam e comparam as tecnologias de conversão térmica a fim de identificar a tecnologia mais eficiente no tratamento de resíduos no que se refere a aplicação do produto final e sua viabilidade são escassos, também não foram encontrados estudos relacionados as tecnologias de conversão térmica e o aterro sanitário de Campina Grande o que confirma o ineditismo deste estudo.

3.2. REFERÊNCIAS

GARCIA, A; MENDONÇA, M. A. **Bio-óleo de resíduos sólidos obtido via pirólise: análise dos parâmetros físico-químicos**. Brazilian Applied Science Review. v. 2, n. 5, p. 1632-1635, Curitiba. 2018. Acesso em 02 de Fev. 2021. Disponível em <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/view/550/473>>

KHURIATI, A.; PURWANTO, P.; HUBOYO, H. S.; SURYONO, S.; & PUTRO, A. B. **Application of aspen plus for municipal solid waste plasma gasification simulation: case study of Jatibarang Landfill in Semarang Indonesia**. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1025, No. 1, p. 012006, 2018. Acesso em 20 Jan. 2020. Disponível em < <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1025/1/012006/meta>

KHAN M. Z. H; SULTANA, M; AL-MAMUN, M. R; HASAN, M. R. **Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend: Fuel Characterization**. J. Environ. Public Health 2016. Acesso em 20 Fev. 2020. Disponível em < <https://www.hindawi.com/journals/jep/2016/7869080/> >

>

LAZZAROTTO, P. I.; JUNGES, J.; FERREIRA, S; MANERA, C. **Avaliação do potencial energético do gás obtido a partir da gaseificação da fração polimérica contida no rejeito (fpr) da triagem de resíduos sólidos urbanos (RSU)**. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo – SP, 2018. Acesso em 5 de Mar. 2021. Disponível em <(PDF) [AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO GÁS OBTIDO A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DA FRAÇÃO POLIMÉRICA CONTIDA NO REJEITO \(FPR\) DA TRIAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS \(RSU\) \(researchgate.net\)](#)>

QUESADA, L., CALERO, M., MARTÍN-LARA, M. A., PÉREZ, A., & BLÁZQUEZ, G. **Characterization of fuel produced by pyrolysis of plastic film obtained of municipal solid waste**. *Energy Volume 186*, Novembro 2019. Acesso em 20 Mar. 2020. Disponível em < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219315464?casa_token=zoL0TYRypEAAAAAA:Z4-zZnwZpHp-MvUTmu6MRhnO1ztXWA-87HliFiG526hqSzuFJDdgX4bWffL_LleZapXV6CI8wN8 >

SOGANCIOGLU, M.; AHMETLI, G.; YEL, E. A. **A Comparative Study on Waste Plastics Pyrolysis Liquid products quantity and energy recovery potetial**. 2nd International Conference on Advances on Clean Energy Research, Berlin. páginas 7-9. Abril 2017. Acesso em 20 Dez. 2019. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217325468> >

SINGH, R. K; RUJ, B; MUKHERJEE, A; SADHUKHAN, A. K; GUPTA, P. **Parthapratim. Pyrolysis of Municipal Plastic Waste: Time Dependent Gas Generation Analysis at 500°C**. Acesso em 12 Dez. 2021. Disponível em < https://www.researchgate.net/profile/Rohit-Singh-73/publication/332093805_Pyrolysis_of_Municipal_Plastic_Waste_Time_dependent_Gas_generation_analysis_at_500_C/links/5d2812f3a6fdcc2462d6611b/Pyrolysis-of-Municipal-Plastic-Waste-Time-dependent-Gas-generation-analysis-at-500-C.pdf >

TULASHIE, S. K; BOADU, E. K; DAPAAH, S. **Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana.** Thermal Science and Engineering Progress. Volume 11, páginas 417-424, Junho de 2019. Acesso em 02 Jan. 2020. Disponível em < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904918305389?casa_token=yNWzesJ75ikAAAAA:tWkr7aHYWIR5pfFp9DpjAVT-a8hm6LM2Oez2V2Wt9NhRbHgWD_ID6MCbH3qEmTjrTUumGIIQtpo >

Zheng, X., Chen, C., Ying, Z., & Wang, B. **Experimental study on gasification performance of bamboo and PE from municipal solid waste in a bench-scale fixed bed reactor.** Energy Conversion and Management, v. 117, p. 393-399, 2016. Acesso 03 Nov. 2021. Disponível em < https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Experimental+study+on+gasification+performance+of+bamboo+and+PE+from+municipal+solid+waste+in+a+bench-scale+fixed+bed+reactor+Xiao+y&btnG= >

CAPÍTULO 4 | SIMULAÇÃO: TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TÉRMICA PARA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RSU

Considerando o grande potencial das tecnologias de conversão térmica no tratamento de resíduos sólidos urbanos, o presente capítulo consiste na simulação e análise do processo de pirólise para tal finalidade. O produto de interesse é a fração líquida, que pode ser utilizado como combustível alternativo.

Para desenvolvimento, simulação e análise do processo utilizou-se como referências os RSU presentes no ASCG. A seleção da tecnologia de conversão térmica adequada depende do insumo utilizado no processo assim como do produto de interesse. Considerando a heterogeneidade dos RSU, antes de passarem pelo processo de pirólise é necessário realizar um processo de triagem com o propósito de separar as frações recicláveis das não recicláveis.

As frações recicláveis dos RSU são: plástico, papel, papelão, vidro, metal, compósitos, madeira, têxteis e couro. Dentre os compostos recicláveis presentes nos RSU observa-se que não são todos os constituintes que se apresentam adequados ao processo de conversão térmica, alguns deles são mais adequados para uma reciclagem mecânica, a exemplo do papelão.

Um fator importante de um combustível é o seu poder calorífico (PCI) o qual quantifica a quantidade de energia contida no composto e quanto maior o poder calorífico maior a energia. Entre os constituintes recicláveis dos RSU do ASCG está plástico, ele é o composto com maior porcentagem presente na fração reciclável, além disto, esse material apresenta alto poder calorífico, como pode-se verificar na Tabela 4.

Tabela 4. Poder calorífico dos polímeros e de alguns combustíveis

Material	Poder calorífico (MJ/KG)
Polietileno	43,3—46,5
Polipropileno	46,5
Poliestireno	41,9
Querosene	46,5
Gasolina	45,2
Petróleo	42,3
RSU	31,8

Fonte: CAVALHEIRO (2017)

Com base na Tabela 4, observa-se o alto PCI dos polímeros, o qual aproximam-se do PCI de combustíveis convencionais como o da gasolina e do petróleo. Esse fato caracteriza os polímeros como uma matéria-prima em potencial para ser utilizada

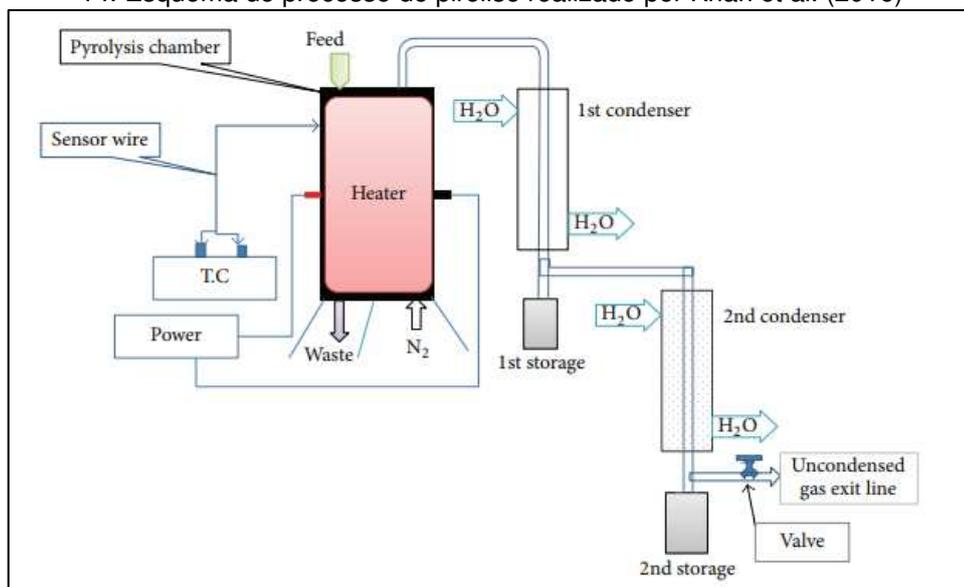
como fonte de energia. Vale ressaltar que o fato da alta porcentagem de polímeros no ASCG também foi considerado na seleção da matéria-prima, além da gama de pesquisas no meio científico relacionadas a conversão térmica dos resíduos poliméricos. Diante do exposto selecionou-se os resíduos poliméricos como matéria prima para reciclagem e conversão em produtos de alto valor agregado a partir da tecnologia de conversão térmica anteposta.

O processo de pirólise foi selecionado inicialmente como uma tecnologia de conversão térmica adequada para os resíduos poliméricos dado que, de acordo com Costa (2006) ao contrário das outras categorias de reciclagem (física e mecânica) o processo pode ser realizado sem a necessidade de uma categoria específica de polímero, além de dispensar a purificação dos mesmos.

A referida modelagem foi realizada com a finalidade de analisar e prever a eficiência do processo de pirólise no tocante a recuperação energética dos resíduos poliméricos. A intenção foi a obtenção e análise do produto final, principalmente da fração líquida. Para realizar a simulação utilizou-se o software Aspen Hysys dado que o mesmo se mostrou capaz de manipular e converter a matéria prima selecionada em pesquisas já realizadas, para tal finalidade, no meio científico.

O processo de pirólise simulado baseou-se no processo experimental de pirólise realizado por Khan et al. (2016). O esquema desse processo encontra-se na Figura 14.

14. Esquema do processo de pirólise realizado por Khan et al. (2016)



Fonte: KHAN ET AL. (2016)

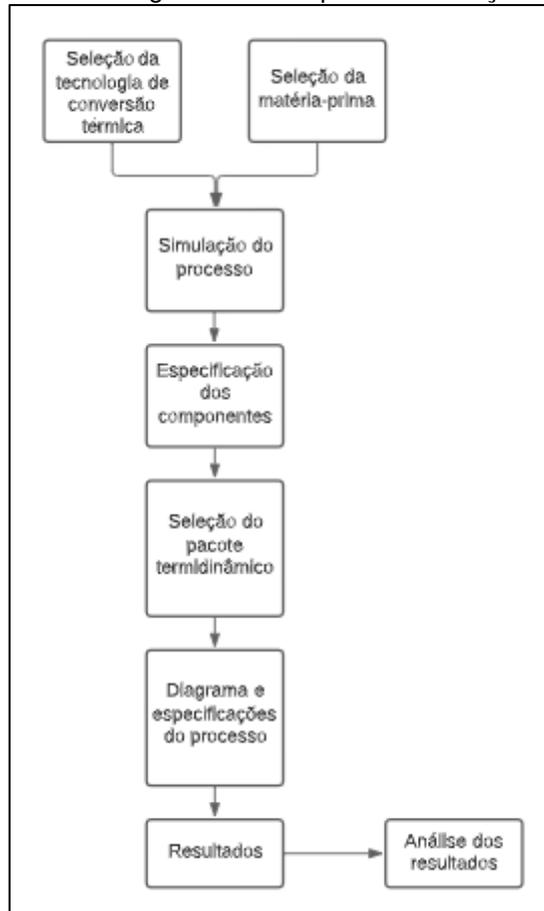
O processo de pirólise de Khan et al. (2016) foi constituído de um reator de leito fixo em escala laboratorial no qual ocorre o processo de despolimerização dos resíduos poliméricos, dois condensadores que convertiam os gases não condensáveis em óleo de pirólise e duas unidades de armazenamento do óleo de pirólise.

Considerando que o processo de pirólise é um processo de degradação térmica a abordagem utilizada considerou a reação de degradação dos polímeros como reação de pirólise a qual converte o polímero em hidrocarbonetos de cadeias menores, desta forma o reator político foi simulado como um reator de conversão.

4.1. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PIRÓLISE NO SOFTWARE ASPEN HYSYS5

O modelo simula o processo de pirólise no estado estacionário em um reator de leito fixo. A Figura 15 apresenta as etapas realizadas para desenvolvimento do mesmo.

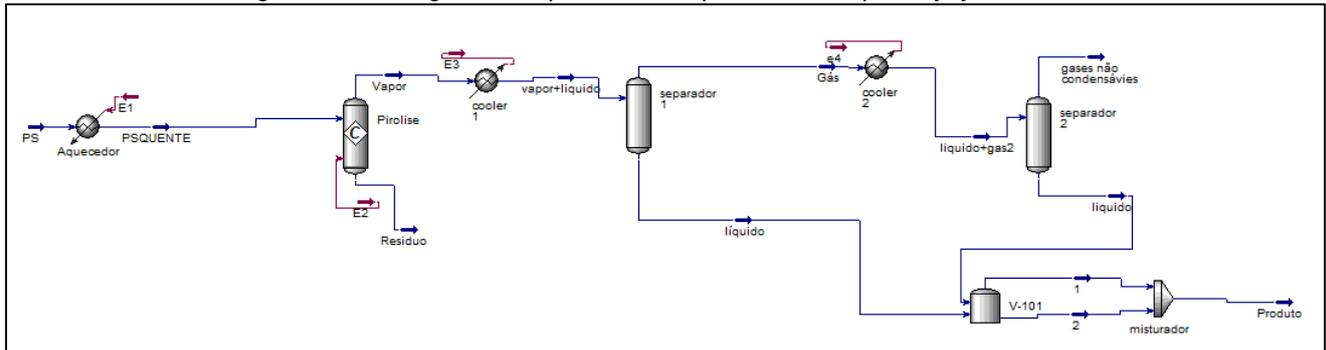
15. Fluxograma das etapas da simulação



Fonte: AUTORA (2022)

O processo de pirólise simulado é constituído de uma unidade de aquecimento, um reator de pirólise, dois separadores e um sistema de arrefecimento composto por dois condensadores. A Figura 16 apresenta o diagrama do processo de pirólise para conversão dos resíduos poliméricos em óleo de pirólise, carvão e gases não condensáveis desenvolvido no Aspen Hysys.

Figura 16. Fluxograma do processo de pirólise no Aspen Hysys



Fonte: AUTORA (2022)

4.1.2 Etapas da Simulação

O processo foi simulado no estado estacionário e considerou-se que o tempo de reação é insuficiente para ocorrer uma interação secundária entre os produtos, dessa forma, não há reações secundárias durante o processo.

A modelagem do processo contou com as seguintes etapas:

1. Seleção dos componentes;
2. Seleção do pacote de fluidos;
3. Montagem do diagrama do processo no Aspen Hysys;
4. Definição das correntes e blocos do processo;
5. Análise dos resultados.

4.1.2.1 Especificação dos Componentes e reações do processo

Existe uma variedade de categorias de materiais poliméricos. Desta forma, a fim de realizar a simulação selecionou-se uma das categorias para representar a mistura de polímeros presentes nos RSU e analisar o produto final dos mesmos.

Dentre os principais polímeros existentes encontram-se o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS), o policloreto de vinila (PVC) e o poliéster (PET).

Escolheu-se as propriedades do poliestireno (PS) para simular e prever os resultados possíveis da pirólise dos polímeros, pois além dele está entre os polímeros mais consumidos mundialmente, o mesmo apresenta uma cadeia homogênea (sem presença de heteroátomos) o que favorece melhores valores de potencial energético. A presença de heteroátomos, como no caso do PVC e PET, deixam os polímeros mais resistentes à processos químicos.

O PS representa a pirólise dos demais polímeros de cadeia homogênea (como o PE e PP) quanto aos produtos alcançados no processo, uma vez que todos são compostos por carbono e hidrogênio, entretanto vale salientar que o tipo de polímero pode influenciar nas quantidades de produto líquido, sólido e gasoso obtidos.

Após definição do polímero que representou os resíduos poliméricos o mesmo, assim como os demais componentes participantes do processo foram determinados e inseridos no simulador. Considerando que o banco de dados do Aspen Hysys não inclui polímeros, os mesmos, assim como os demais componentes, foram determinados com base na reação de pirólise.

Na pirólise, também denominada de craqueamento térmico, os polímeros são submetidos ao aquecimento na ausência de oxigênio e sofrem uma degradação, a simulação da pirólise do PS foi baseada na equação da degradação térmica do mesmo (Equação 7).



Os componentes foram selecionados e inseridos no ambiente de simulação de acordo com a Equação 7. O quadro 3 apresenta a entrada de dados no Aspen Hysys V10 referente a lista de componentes envolvida na pirólise do PS.

Quadro 5. Entrada de dados no Aspen Hysys dos componentes envolvidos no processo

Componente	Tipo
Estireno	Componente puro
Hidrogênio	Componente puro
Metano	Componente puro
Etano	Componente puro
Etileno	Componente puro
Ciclopropano	Componente puro

Propano	Componente puro
n-butano	Componente puro
n-Pcycpentan	Componente puro
1- Hexadeceno	Componente puro
1-C28	Componente puro
Carbon	Componente puro

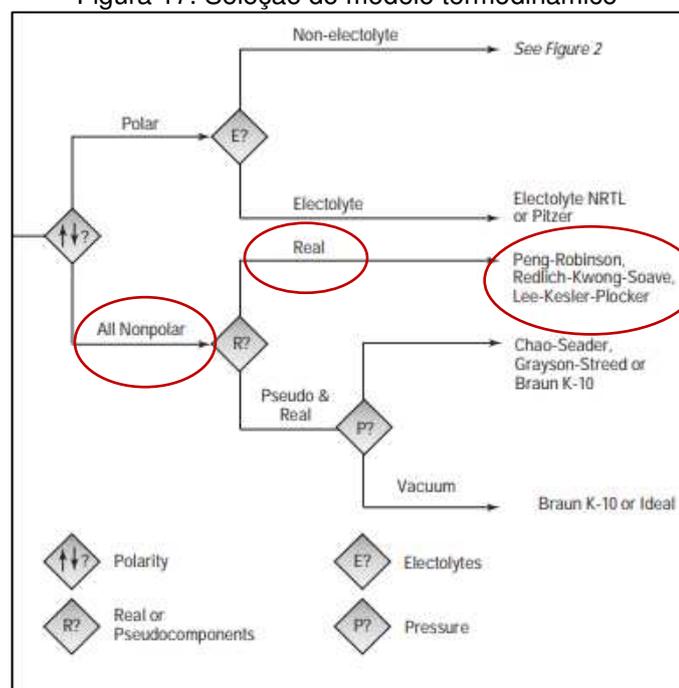
Fonte: AUTORA (2022)

4.1.2.2. Modelo Termodinâmico

Para seleção do modelo termodinâmico adequado ao processo utilizou-se o método da árvore de decisões, proposto por Carlson (1996). Na Figura 17 observa-se o referido método e o modelo termodinâmico selecionado a partir do mesmo.

Uma vez que o poliestireno é um composto fracamente apolar, pode-se dizer que ele é praticamente polar, além disto, um composto real, sendo recomendado os seguintes modelos: Peng-Robson, Redlich-Kwong-Soave e Lee-Kesler-Plocker.

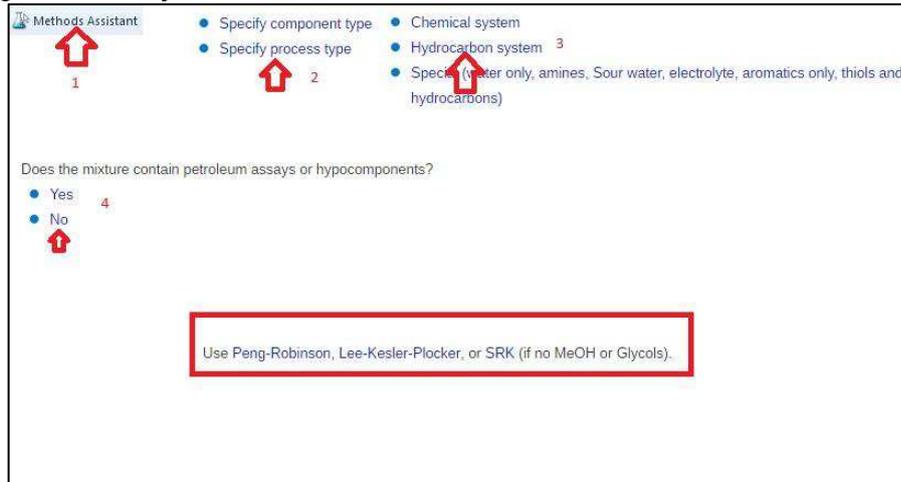
Figura 17. Seleção do modelo termodinâmico



Fonte: Adaptado de CARLSON (1996)

O assistente para escolha do método termodinâmico do Aspen Hysys o “*methods assistant*” também foi utilizado para a seleção do modelo, com a intenção de comparar com o resultado do modelo proposto por Carlson (1996). O passo a passo da escolha do método termodinâmico com o auxílio do “*methods assistant*” encontra-se na Figura 18.

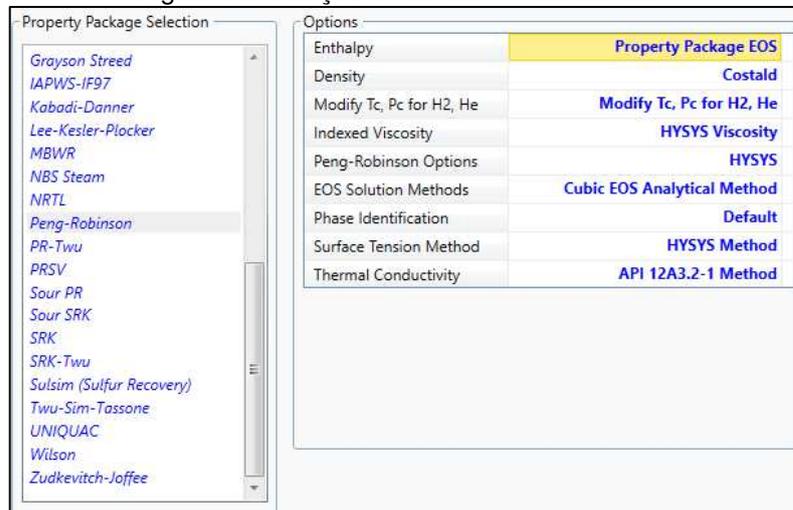
Figura 18. Seleção do modelo termodinâmico com auxílio do “*methods assistant*”



Fonte: AUTORA (2022)

Após análise dos modelos termodinâmicos sugerido pela árvore de decisões proposta por Carson (1996) e o “*methods assistant*”, o pacote de fluidos utilizado para estimar as propriedades físicas e química dos componentes foi o pacote de propriedades Peng-Robinson (PR). Na Figura 19 é possível observar a seleção do modelo termodinâmico no Aspen Hysys.

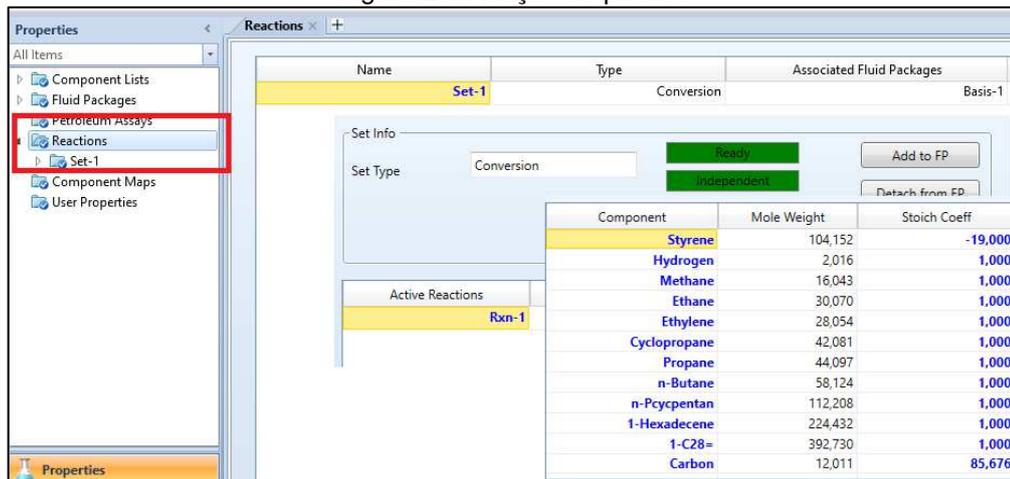
Figura 19. Seleção do modelo termodinâmico



Fonte: AUTORA (2022)

Após a seleção do modelo termodinâmico a equação de pirólise (Equação 7) foi adicionada ao pacote de fluidos selecionado assim como é possível observar na Figura 20. No simulador a reação é inserida na aba “*reactions*” onde foram inseridos os reagentes e produtos com seus respectivos coeficientes estequiométricos.

Figura 20. Reação de pirólise



Fonte: AUTORA (2022)

Definidos os componentes e o modelo termodinâmico, o diagrama do processo, denominado no simulador como *Flowsheet*, foi desenvolvido no ambiente do Aspen Hysys. A entrada de dados correspondente aos blocos inseridos no ambiente de simulação, assim como as condições do processo são apresentados a seguir.

4.1.2.3. Corrente de alimentação

O resíduo polimérico entra a uma taxa de 100 kg/h, e pela Tabela 5 é possível observar as variáveis termodinâmicas da corrente de alimentação do processo.

Temperatura	25° C
Pressão	1 atm

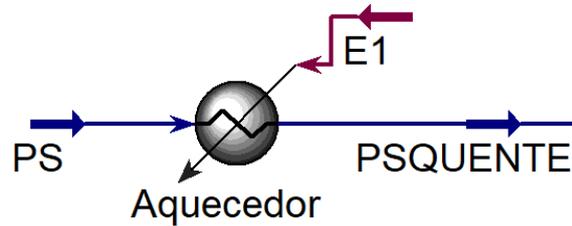
Fonte: AUTORA (2022)

4.1.2.4. Aquecimento

A matéria-prima deve ingressar no reator de forma fundida, dessa forma, a mesma passa por um processo de aquecimento. A unidade de aquecimento (Figura 21) foi simulada utilizando um bloco “*heater* “. Na corrente de alimentação a matéria-

prima entra a temperatura ambiente e é aquecida até uma temperatura de 220 °C (PSQUENTE).

Figura 21. Unidade de pré-tratamento do resíduo

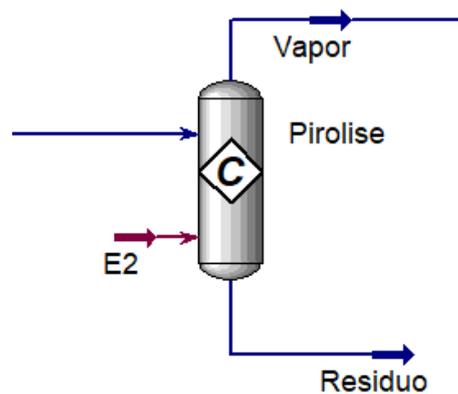


Fonte: AUTORA (2022)

4.1.2.5. Pirólise

Após aquecimento o polímero segue para o reator de pirólise. Para simular o reator de pirólise utilizou-se o bloco reator de conversão visto que o mesmo exige apenas o conhecimento da estequiometria da reação do processo e a conversão do reagente base. A Figura 22 apresenta o reator de pirólise e o bloco do Aspen Hysys utilizado para simulação.

Figura 22. Reator de pirólise (reator de conversão)



Fonte: AUTORA (2022)

As variáveis termodinâmicas do reator de pirólise encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6. apresenta as variáveis termodinâmicas do reator de pirólise

Temperatura	330°C
Pressão	1 atm

Fonte: AUTORA (2022)

Como a simulação e modelagem do processo baseia-se no processo experimental desenvolvido por Khan et al. (2016) a temperatura de pirólise foi 330^o C, uma das temperaturas de operação utilizadas pelo referido autor. Outro fator considerado para a temperatura de pirólise foi a temperatura de degradação térmica do OS, a qual ocorre a baixas temperaturas, além disto, temperaturas acima de 500^o C ocorre maior craqueamento dos plásticos e conseqüentemente uma maior fração gasosa.

No reator ocorre a reação de pirólise que produz resíduos sólidos (carvão) e produtos voláteis. O carvão pode ser armazenado para posterior comercialização ou outras aplicações. Os produtos voláteis seguem para o sistema de arrefecimento com a finalidade da obtenção do produto líquido a partir da condensação dos gases presentes na fração gasosa obtida no reator de pirólise.

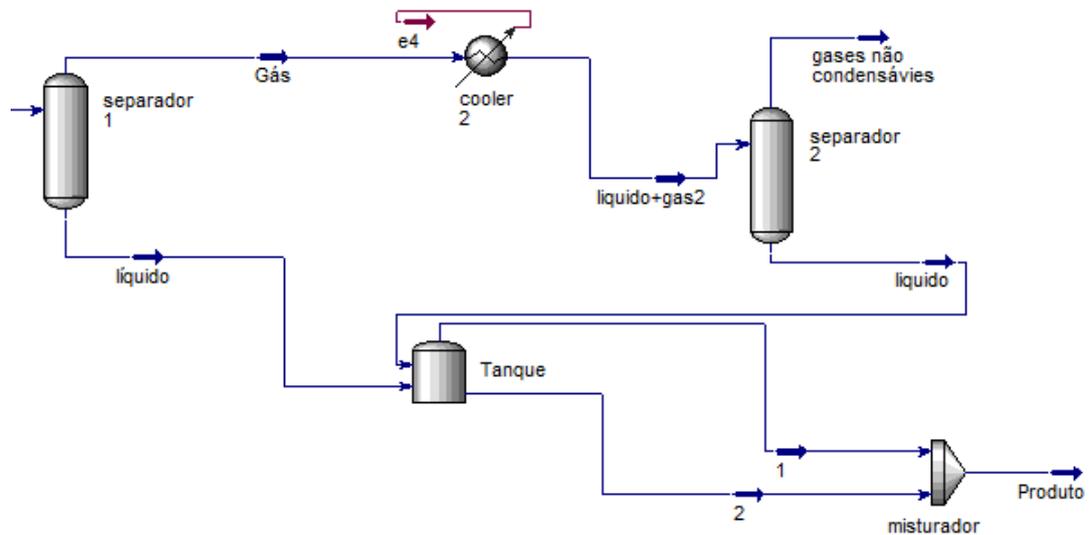
4.1.2.6. Sistema de arrefecimento

Os gases obtidos no reator de pirólise são conduzidos para o sistema de arrefecimento, que é composto por dois condensadores para resfriar os vapores obtidos no reator de pirólise. Para tal sistema, além de basear-se no processo de pirólise de Khan et al. (2016), considerou-se os sistemas de condensadores industriais que operam em dois estágios de temperatura em série a fim de proporcionar um gradiente de temperatura, o que origina uma recuperação de entalpia de condensação dos vapores.

O vapor (constituído por uma mistura de hidrocarbonetos) é direcionado ao condensador 1 onde será resfriado até uma temperatura de 100 °C produzindo uma mistura líquido-vapor que segue para o separador 1 (Figura 21) para obtenção das fases vapor e líquido.

A fase líquida obtida no separador 1 é armazenada no tanque de armazenamento e a fase vapor remanescente é direcionada para o segundo condensador, no qual o vapor é novamente resfriado até uma temperatura de 60 °C. Novamente obtém-se uma mistura líquido-vapor que segue para o separador 2.

Figura 23. Sistema de resfriamento e geração da fração líquida



Fonte: AUTORA (2021)

No separador 2 ocorre novamente a separação da fase líquida e da fase vapor, a fase líquida segue para o tanque de armazenamento e é misturada a fase líquida obtida no separador 1 gerando o produto líquido da pirólise. A fase vapor que deixa o separador 2 corresponde aos gases não condensáveis e, portanto, ao produto gasoso obtido no processo de pirólise.

4.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.2.1. Balanço de Massa

A principal finalidade do processo de pirólise é a obtenção de produtos de alto valor agregado, ao final da simulação, como é possível observar no balanço de massa do processo (Tabela 7) tal objetivo foi concluído, visto que, foi possível a conversão de polímeros em produtos nas fases sólida, líquida e gasosa.

Tabela 7. Balanço de massa do processo simulado

Componente	Fluxo em massa (kg/h)
Polímero	100
Sólido	49,4
Gás	12,88
Líquido	37,72

Fonte: AUTORA (2022)

O rendimento do produto de interesse, o óleo de pirólise, do processo simulado foi confrontado com o rendimento obtido por Khan et al. (2016), já que o mesmo foi base para o desenvolvimento da simulação.

Ao realizar a pirólise de resíduos poliméricos com uma temperatura de operação igual a temperatura do processo modelado no Aspen Hysys (330 °C) Khan et al. (2016) obteve o rendimento de 38,55% de óleo de pirólise. De acordo com a Tabela 7, observa-se que os dados obtidos no processo simulado, quanto ao rendimento da fração líquida, corroboram com os dados experimentais, dado que, obteve-se uma conversão de aproximadamente de 38% dos polímeros na fração líquida.

4.2.2. Composição do Produto: Fração Líquida

A Tabela 8 apresenta a constituição da fração líquida do óleo de pirólise obtido no processo desenvolvido no Aspen Hysys.

Tabela 8. Composição da fração líquida do óleo de pirólise

Composto	Fração molar
Estireno	0,2161
H ₂	0,0001
Metano	0,0005
Etano	0,0016
Etileno	0,0012
Ciclopropano	0,0049
Propano	0,0042
n-butano	0,0107
Octano	0,2061
1-hexadecene	0,2773
1-Octacoseno	0,2773

Fonte: AUTORA (2022)

Ao analisar a composição da fração líquida do óleo de pirólise obtido, verifica-se a baixa concentração de hidrocarbonetos de cadeia carbônica menor e, portanto, com menor quantidade de átomos de carbono, a exemplo do metano, etano, etileno, ciclopronano, propano e n-butano, em contrapartida, existe uma maior participação de hidrocarbonetos com maior número de átomos de carbono.

O óleo de pirólise obtido por Costa (2006) também apresentou baixa concentração de hidrocarbonetos de cadeia menor e maior concentração de n-nonano e n-decano, ou seja, hidrocarbonetos com maior quantidade de átomos de carbono. De acordo com este autor isso é uma consequência do anel benzênico presente na estrutura do PS que não favorece a quebra de ligações, dessa forma os traços de alcanos encontrados no óleo de pirólise podem ter se formado a partir da combinação de pequenos radicais que se liberam da cadeia carbônica.

4.2.3. Composição do Produto: Gases não condensáveis

A Tabela 9 apresenta a constituição da fração gasosa do óleo de pirólise obtido no modelo desenvolvido no Aspen Hysys.

Tabela 9. Composição da fração gasosa do óleo de pirólise

Composto	Fração molar
Estireno	0,0298
H ₂	0,1352
Metano	0,1350
Etano	0,1345
Etileno	0,1347
Ciclopropano	0,1329
Propano	0,1332
n-butano	0,1300
Octano	0,0347
1-hexadecene	0
1-Octacoseno	0

Fonte: AUTORA (2022)

A composição da fração gasosa do processo de pirólise realizado por Khan et al. (2016) constitui-se principalmente de hidrogênio, carbono dióxido, monóxido de carbono, metano, etano e butadieno, apresentando ainda traços de propano, propeno, n-butano e outros hidrocarbonetos.

Ao observar a Tabela 9 e a constituição do gás obtido no processo de pirólise simulado é possível constatar a similaridade na composição do gás obtido por Khan et al. (2016), dado que, o gás obtido também é constituído majoritariamente por hidrogênio, metano e etano apresentando ainda os compostos: propano e butano.

No processo de pirólise do poliestireno realizado por Parka et al. (2020) a composição da fração gasosa apresenta também similaridade com a composição do

gás obtido no processo de pirólise de Khan et al. (2016) e do modelo simulado, sendo composto por hidrogênio, metano, etano, eteno, propeno, buteno, butadieno e outros gases.

4.2.4. Fração Sólida

Na fração sólida, apesar de ser possível em sua constituição hidrogênio e carbono, considerou-se na simulação que o mesmo é composto apenas por carbono.

Observa-se a produção de uma grande quantidade de resíduo sólido no processo de pirólise. Considerando a temperatura de pirólise (330 °C), verifica-se que esta é classificada como uma pirólise lenta, que, de fato, propicia uma maior produção de resíduos sólidos. Pesquisas como a de Miandad et al. (2016) corroboram com essa afirmação visto que o mesmo ressalta que temperaturas de pirólise abaixo de 450 °C contribuem para uma maior formação de resíduo sólido.

4.2.5. Propriedades do Óleo de Pirólise

Na Tabela 10 são apresentadas algumas propriedades físicas do óleo de pirólise obtido na simulação da pirólise do PS. Observa-se também nesta tabela um comparativo de tais propriedades com dados experimentais do óleo de pirólise do PS e/ou de resíduos poliméricos, como também com combustíveis convencionais.

Tabela 10. Propriedades físicas do óleo de pirólise

Propriedade	Dados experimentais	Dados da Simulação	Gasolina	Diesel
Densidade (g/cm ³)	0,92 (Miandad et. al, (2016))	0,7198	0,780	0,807
	0,7477 (Khan et al (2016))			
	0,7991 Syamsiro et al. (2014)			
Viscosidade dinâmica (cP)	1,77 (Miandad et. al, 2016)	1,640	1,17	1—4,11

Fonte: KHAN ET AL. (2016); MIANDAD ET AL. (2016); SYAMSIRO ET AL. (2014)

O óleo de pirólise apresenta características semelhantes à de combustíveis convencionais e por isto o mesmo tem potencial como um combustível alternativo. A viscosidade é uma importante propriedade dos combustíveis a partir desta propriedade, é determinada as temperaturas de armazenamento, bombeamento econômico e pulverização para combustão. Vale salientar que, quanto maior a viscosidade do combustível, maior o consumo do mesmo.

Verifica-se que a viscosidade dinâmica do óleo de pirólise obtido a partir da pirólise do PS assemelha-se a dados existentes na literatura provenientes de processos de pirólise experimentais, além dito, essa propriedade está dentro da faixa 1—4,11 cP, correspondente à viscosidade do diesel.

4.2.6 Condições do Processo e Rendimento dos Produtos

A análise dos resultados obtidos no processo de pirólise do PS desenvolvido no Aspen Hysys permitem constatar que o modelo é capaz de prever o processo assim como o produto final obtido, visto que, dados experimentais corroboram com os dados do modelo desenvolvido. Além disto, o modelo consegue prever o processo de pirólise de outros polímeros a partir da reação de degradação térmica dos mesmos, desta forma, o processo anteriormente descrito pode ser utilizado na previsão do comportamento do processo de pirólise de polímero de forma geral.

Entretanto, alguns pontos importantes quanto ao processo e o software utilizado para simulação do mesmo foram constatados ao desenvolver a pesquisa, são eles:

- Os rendimentos dos produtos dependem diretamente das condições de operação, desta forma, visto que, a fração líquida é o produto de maior interesse, seu rendimento pode ser otimizado de acordo com as variáveis do processo, porém, o software utilizado não apresenta tal recurso (otimização do processo) apenas a possibilidade de realizar estudos de casos.
- Ao analisar o processo de pirólise com outras categorias de plásticos, percebeu-se a dificuldade da inserção dos componentes visto vez que tal simulador não apresenta um pacote específico para polímeros.
- O Aspen Hysys apresenta limitação quanto a trabalhar com sólidos no reator.

Diante de tais fatos, mesmo que, inicialmente o Aspen-hysys tenha apresentado resultados satisfatórios, o desenvolvimento da simulação e tentativa de otimização do processo e análise dos dados levaram a busca por um software mais robusto e com um banco de dados mais amplo e que permita uma análise mais abrangente do processo e uma posterior otimização do mesmo.

Aliado a isto, mesmo constatando-se a capacidade de converter matéria orgânica em produtos de alto valor agregado o processo de pirólise ainda necessita ser estudado. Cruz (2012) menciona que tal tecnologia ainda se encontra em processo de desenvolvimento, a principal dificuldade do processo é a composição do óleo de pirólise, suas propriedades acarretam diversos problemas quando o mesmo é utilizado como combustível, sua alta viscosidade, o comportamento quando sofre combustão entre outras características são difíceis de manipular e limitam significativamente as aplicações desse produto.

Alternativamente o produto da pirólise pode ser utilizado para geração de eletricidade e calor, dessa forma é necessário um sistema integrado ao modelo aqui proposto para conversão do óleo de pirólise em energia e calor.

4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo simplificado de pirólise foi modelado com sucesso no Aspen Hysys dado que o modelo realizou, simulou e previu os produtos obtidos a partir da pirólise dos plásticos. Além disto, os produtos obtidos, apresentam algumas propriedades e composição similar as que se encontram na literatura, consolidando dessa forma o modelo.

Entretanto, uma análise mais minuciosa do modelo desenvolvido evidencia a necessidade de uma otimização das variáveis de processo, ferramenta indisponível no Aspen Hysys. Observou-se ainda a dificuldade de inserção de componentes poliméricos uma vez que o Aspen Hysys não apresenta tais compostos em seu banco de dados.

Além das dificuldades encontradas na simulação utilizando o software escolhido, ao analisar os produtos de interesse -óleo de pirólise- observa-se que o mesmo ainda não é comercializado, estudos no que se refere ao seu uso e otimização de suas propriedades com a finalidade de utilizá-lo como combustível alternativo ainda estão em desenvolvimento.

Diante do exposto, observa-se que, o processo de pirólise é promissor no que se refere ao tratamento e recuperação de RSU, entretanto necessita de mais estudos a fim de ser utilizado com todo seu potencial principalmente no que se refere ao óleo de pirólise. Além disto, observa-se a necessidade de um software mais robusto, com um banco de dados mais amplo e com mais ferramentas de análise.

4.8 REFERÊNCIAS

CARLSON, E. C. **Don't Gamble With Physical Properties For Simulations**. CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS, 1996. Acesso em 20 Nov. 2021. Disponível em < <http://www.cchem.berkeley.edu/cbe150b/docs/VLE/Guidelines.pdf> >

CRUZ, J. C. da. **Evolução tecnológica das rotas de gaseificação e pirólise de materiais lignocelulósicos: um estudo bibliométrico**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012. Acesso em 12 Jan. 2022. Disponível em < <http://objdig.ufrj.br/61/dissert/793949.pdf> >

CAVALHEIRO, O. de L. **Óleo de resíduo Polimérico do tipo polipropileno como combustível alternativo para motores do ciclo a diesel**. Dissertação (Mestrado em engenharia química). Santa Maria, MS, 2017. Acesso em 12 Nov. 2021. Disponível em < https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/14582/DIS_PPGEQ_2018_CAVALHEIRO_ORLANDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y >

COSTA, P. A. da C. **Produção de hidrocarboneto líquidos e gasosos por pirólise de resíduos plásticos. Tese (Doutorado em engenharia química)**. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de ciências e tecnologia, Lisboa, 2006. Acesso em 20 Nov. 2021. <Disponível em <https://docero.com.br/doc/s5588xs>>

GONÇALVES, C. K. **Pirólise e combustão de resíduos plásticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia)**. Escola Politécnica da universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. Acesso em 12 Fev. 2021. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919319270> >

KHAN, M. Z. H; SULTANA, M; AL-MAMUN, M. R; HASAN, M. R. **Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend: Fuel Characterization**. J. Environ. Public Health 2016. Acesso em 20 Fev. 2020. Disponível em < <https://www.hindawi.com/journals/jeph/2016/7869080/> >

MIANDAD, R., NIZAMI, A. S., REHAN, M., BARAKAT, M. A., KHAN, M. I., MUSTAFA, A., ISMAIL, I.M.I & MURPHY, J. D. **Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil**. *Waste Management*, 58, 250-259. 2016. Acesso em 15 Nov. 2021. Disponível em https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16305268?casa_token=KimGe12fub8AAAAA:vvF-hL8W2MALWBBnKee5Schwv2eoyr4tC2VGdqLe30cTMZsAhUgSdfSJuiXKx0VvJqDe n9F-mms

PARKA, KI-BUM; JEONGB, YONG-SEONG; GUZELCIFTCIA, BEGUM, KIM, JOO-SIK. **Two-stage pyrolysis of polystyrene: Pyrolysis oil as a source of fuels or benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes**. *Applied Energy*, 2020. Acesso e 02 Mar. 2021. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919319270>>

SYAMSIRO, M., SAPTOADI, H., NORSUJIANTO, T., NOVIASRI, P., CHENG, S., ALIMUDDIN, Z., & YOSHIKAWA, K. **Fuel oil production from municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors.** *Energy Procedia*, 47, 180-188. 2014. Acesso em 12. Nov. 2021. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214002288> >

CAPÍTULO 5 | SIMULAÇÃO: GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS PARA OBTENÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE E GERAÇÃO DE ENERGIA

A partir da simulação e análise do referido processo no Capítulo 5, verificou-se a necessidade do desenvolvimento de mais pesquisas a respeito do processo de pirólise e suas condições e de estudos no se refere ao tratamento da fração líquida obtida e sua posterior comercialização,

A fração líquida poderia ainda ser convertida em energia, porém, para tal finalidade a gaseificação apresenta-se mais viável e com maior potencial de conversão e viabilidade econômica no momento atual, pois, seu produto, o gás de síntese, permite além da produção de energia outras aplicações.

O gás de pirólise e o gás de síntese são distintos. O gás produzido na pirólise é um gás forte, ele tem a composição dos gases não condensados: metano, etano, propano e um pouco de butano, sempre presentes na pirólise. o gás de síntese é um gás interessante e tem várias rotas químicas para produção de outros produtos, como hidrogênio, destilados médios (diesel, ceras etanol, metanol) entre outros, dessa forma, o produto proveniente dessa tecnologia de conversão térmica apresenta-se mais atrativo de imediato em relação ao produto da pirólise,

O processo de gaseificação dos resíduos poliméricos foi realizado no Aspen Plus utilizando a abordagem da minimização da energia livre de Gibbs. Logo, o modelo desenvolvido é uma combinação das leis de conservação de energia e massa inserido em um modelo de equilíbrio termodinâmico e químico de uma unidade de gaseificação.

Uma vez que a abordagem utilizada considerou que as reações atingem um equilíbrio químico, o produto obtido no processo de gaseificação (gás de síntese) foi obtido a partir da minimização da energia livre de Gibbs dos produtos e reagente.

5.1. SELEÇÃO DO SIMULADOR

Para simulação e modelagem da gaseificação dos resíduos sólidos poliméricos utilizou-se o Aspen Plus. A substituição do Aspen Hysys, utilizada no cenário anterior ocorreu devido suas limitações quanto a ausência de um modelo específico para desenvolvimento e simulações de processos que envolvem polímeros dificultando na

hora de defini-los, além disto o referido Software apresenta um pacote muito limitado no tocante a processos com sólidos no reator.

O Aspen Plus, que possui interface parecida com o aspen Hysys, sendo ambos desenvolvidos pelo mesmo grupo tecnológico (AspenTech) também permite a criação de fluxograma e previsão de processos químicos, entretanto é um simulador mais complexo e robusto, apresentando as seguintes vantagens relevantes aos processos trabalhados na presente pesquisa:

- É um pacote de simulação mais complexo, desenvolvido para processo líquido-vapor assim como para processos com sólidos e substâncias complexas como por exemplo o carvão, presente no processo de pirólise e gaseificação, ambos trabalhados na presente pesquisa;
- Permite, caso o composto não pertença ao banco dados, definir componentes não convencionais em função de suas análises imediata e elementar;
- Apresenta um banco de dados completo e amplo no que se refere as propriedades das mais variadas substâncias e componentes;
- Permite realizar análise de sensibilidades, assim como otimização das variáveis do processo;
- Realiza o balanço simultâneo de massa e energia dos fluidos e sólidos e permite ainda integrar sub-rotinas realizadas no Fortran, Matlab e Excel;

Diante do exposto as características e ferramentas do Aspen Plus apresentaram-se mais adequadas para simulação do processo de pirólise e gaseificação dos RSU e em consequência disto, decidiu-se dar sequência ao desenvolvimento da presente pesquisa utilizando o software Aspen Plus que mesmo com uma interface familiar ao Hysys mostra-se mais complexo e rígido para a referida finalidade.

5.2. MODELAGEM DA PLANTA NO SOFTWARE ASPEN PLUS

5.2.1. Hipóteses

Uma ferramenta utilizada em larga escala com a finalidade de prever e projetar processos químicos é a simulação de processos, a qual envolve a elaboração do fluxograma do processo assim como a resolução de seu balanço de massa e energia diante das variáveis e hipóteses assumidas. A presente seção apresenta a simulação

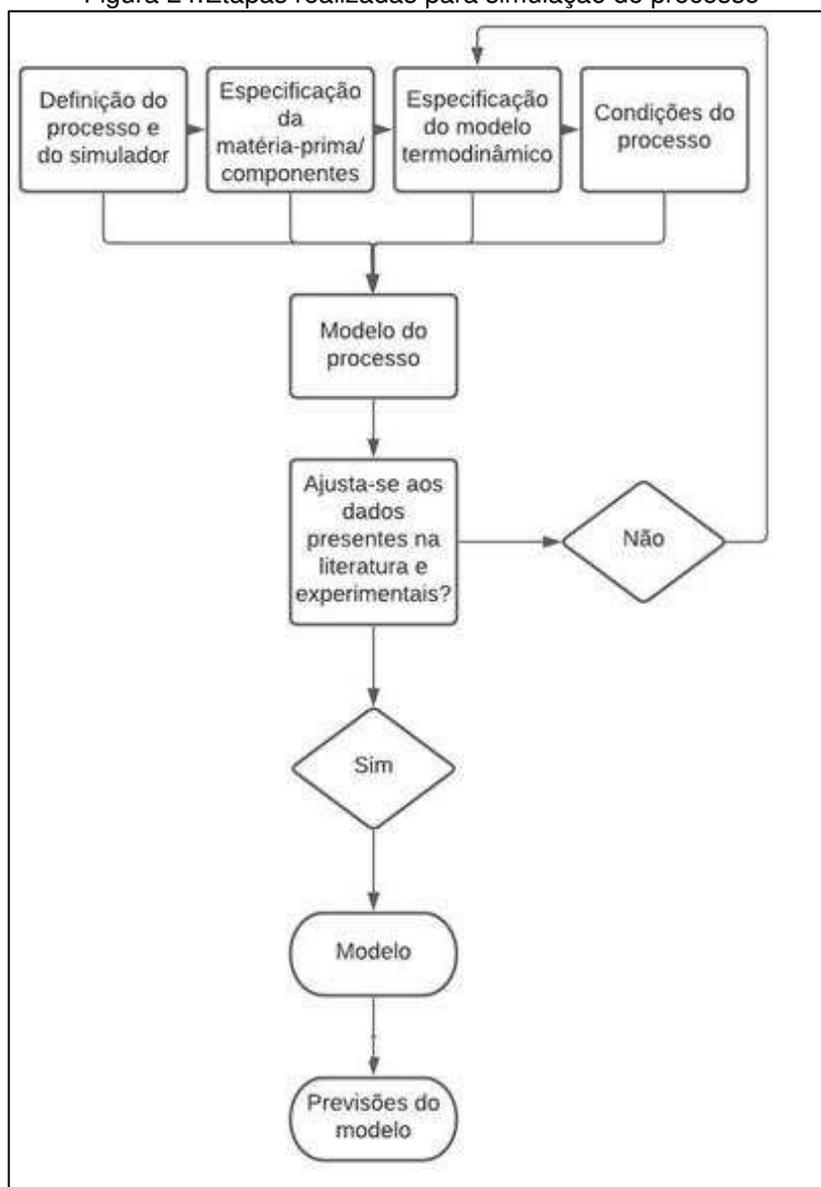
do processo de gaseificação de polímeros, para desenvolvimento do mesmo assumiu-se as seguintes hipóteses:

1. O processo ocorre em regime permanente;
2. O reator no qual ocorre a gaseificação, denominado gaseificador, é isotérmico, dessa forma, a temperatura de leito é uniforme em todo o reator, Além disto, desconsidera-se as características hidrodinâmicas do reator;
3. As taxas em que as reações do processo de gaseificação ocorrem e o tempo de residência são suficientemente longos para a ocorrência do equilíbrio, além disto, supõe-se que todas as reações químicas atingem o equilíbrio dentro do gaseificador;
4. A matéria-prima (polímero) é constituída apenas por Carbono (C), Hidrogênio (H₂), Oxigênio (O₂), Nitrogênio (N) e enxofre (S);
5. Considera-se que na gaseificação os processos de secagem e pirólise ocorrerem de forma instantânea e nesses processos é formado apenas resíduos carbonosos e voláteis constituídos de metano, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxigênio, nitrogênio, sulfeto de hidrogênio e água;
6. Durante o processo de gaseificação o tamanho das partículas permanece constante;
7. No gás de síntese obtido a partir da gaseificação considerou-se apenas o fluxo dos seguintes elementos: metano, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxigênio, nitrogênio, sulfeto de hidrogênio e água;
8. As perdas de calor para o meio são desconsideradas;
9. Não há formação de alcatrão na gaseificação;
10. O “char” é constituído apenas por carbono, assume-se ainda que as cinzas são inertes. Não é considerado nos compostos formados o óxido de nitrogênio.
11. Assume-se que o processo é auto térmico, dessa forma, o calor produzido na zona de combustão é suficiente para aumentar a temperatura de todas as partículas.

5.2.2 Etapas do Processo

Alinhado a finalidade da presente proposta, a Figura 31 apresenta as etapas realizadas para modelagem da gaseificação de resíduos poliméricos no Aspen Plus.

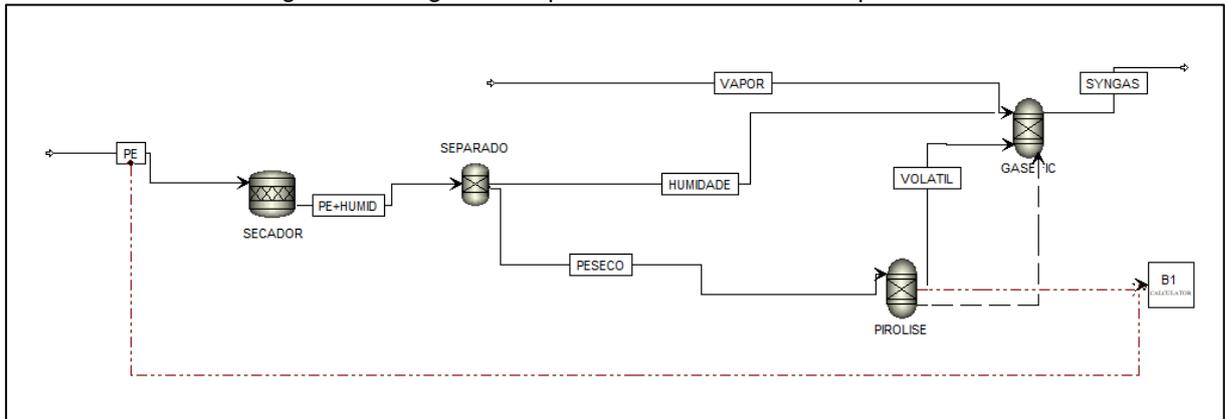
Figura 24. Etapas realizadas para simulação do processo



Fonte: AUTORA (2022)

A Figura 25 apresenta o diagrama do processo de gaseificação de resíduos poliméricos modelado no Aspen Plus fazendo uso de seus blocos integrados. O processo é composto por três etapas, sendo elas: aquecimento, pirólise e gaseificação.

Figura 25. Diagrama do processo modelado no Aspen Plus



Fonte: AUTORA (2022)

Inicialmente a matéria-prima (PE) passa pelo processo de aquecimento correspondente aos módulos: secador e separador. Após essa etapa a matéria-prima segue para o tratamento térmico correspondentes ao processo de pirólise e gaseificação. O tratamento térmico é composto pelos seguintes módulos: reator de pirólise (Pirólise) e gaseificador (Gasefic). O desenvolvimento da simulação assim como cada etapa que constitui o processo será descrita e discutida separadamente nas seções subsequentes.

5.2.3. Especificações Gerais

Antecedendo a especificação dos componentes e desenvolvimento do fluxograma do processo necessita-se determinar as configurações globais do sistema, ou seja, o sistema de unidades utilizado para desenvolvimento da simulação, definição de correntes e subcorrentes, fluxo básico e pressão ambiente. Na Figura 26 pode-se observar as especificações globais definidas no Aspen Plus.

Figura 26. Configurações globais

Global unit set	MET
Global settings	
Input mode	Steady-State
Stream class	MIXCINC
Flow basis	Mass
Ambient pressure	1 atm
Ambient temp.	283,15 K
Valid phases	
Free water	No
Operational year	8766 hr

Fonte: AUTORA (2022)

O sistema “*Metric engineering units*” foi selecionado como sistema de unidade utilizado na simulação e para definição dos fluxos de correntes e subcorrentes selecionou-se a classe de corrente MIXCINC, utilizada para simulações que envolvem componentes convencionais além de sólidos convencionais e não convencionais sem a distribuição do tamanho de partículas.

5.2.4. Seleção dos componentes

Inicialmente, no ambiente de simulação é necessário a definição dos componentes convencionais, assim como do polímero e das cinzas (ASH) definidos como compostos não convencionais.

A especificação dos compostos químicos envolvidos no processo considerou as reações de gaseificação e a análise próxima e última do polímero. Para simular o polímero como matéria-prima utilizou-se a análise elementar do Polietileno (PE), a qual encontra-se nas Tabela 11 e 12.

Tabela 11. Análise Próxima do PE

Polímero	Análise próxima			
	Moisture	FC	VM	Ash
	0,02	0	99,85	0,15

Fonte: Adaptado KANNAN ET AL. (2012)

Tabela 12. Análise última do PE

Polímero	Análise última						
	Ash	C	H	N ₂	Cl ₂	S	O ₂
	0,15	85,81	13,86	0,12	0	0,06	0

Fonte: Adaptado KANNAN ET AL. (2012)

Na Figura 27 é possível observar a entrada de dados correspondente aos componentes selecionados no Aspen Plus para desenvolvimento e modelagem do processo de gaseificação.

Figura 27. Seleção dos componentes envolvidos na simulação

Component ID	Type	Component name	Alias
O2	Conventional	OXYGEN	O2
H2O	Conventional	WATER	H2O
CH4	Conventional	METHANE	CH4
N2	Conventional	NITROGEN	N2
H2	Conventional	HYDROGEN	H2
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
CO	Conventional	CARBON-MONOXIDE	CO
H2S	Conventional	HYDROGEN-SULFIDE	H2S
S	Conventional	SULFUR	S
C	Solid	CARBON-GRAPHITE	C
ASH	Nonconventional		
PE	Nonconventional		

Fonte: AUTORA (2022)

Uma vez que os compostos não convencionais não se encontram no banco de dados do Aspen Plus é necessário determinar suas propriedades físicas. Os modelos ENTHGEN e DNSTYGEN foram utilizados para determinar a entalpia e massa específica do polímero, já para o composto ASH (cinzas) utilizou-se os métodos HCOALGEN e DCOALIGT.

5.2.5. Seleção do pacote de fluidos

Ao contrário do Aspen Hysys, o Aspen Plus apresenta um pacote de fluidos específico para sistemas que trabalham com polímeros. Para auxiliar na escolha do método termodinâmico adequado utilizou-se o “*Methods Assistant*” do Aspen Plus. Foi especificado no “*Methods Assistant*” o sistema e suas características e baseado nessas informações o assistente apresentou os métodos termodinâmicos adequados.

O modelo termodinâmico selecionado para a referida simulação foi o método polímero NRTL (*POLYNRTL*), método de propriedades de dois líquidos não aleatórios do polímero.

5.2.6. Definição das correntes

5.2.6.1. Corrente de alimentação de polímero

O PE foi inserido a uma vazão em massa de 6 kg/hr. As variáveis termodinâmicas referentes a referida corrente de alimentação podem ser observadas na Tabela 13.

Tabela 13. Variáveis termodinâmicas da corrente de alimentação do PE

Variável	
Temperatura	25°C
Pressão	1 atm

Fonte: AUTORA (2022)

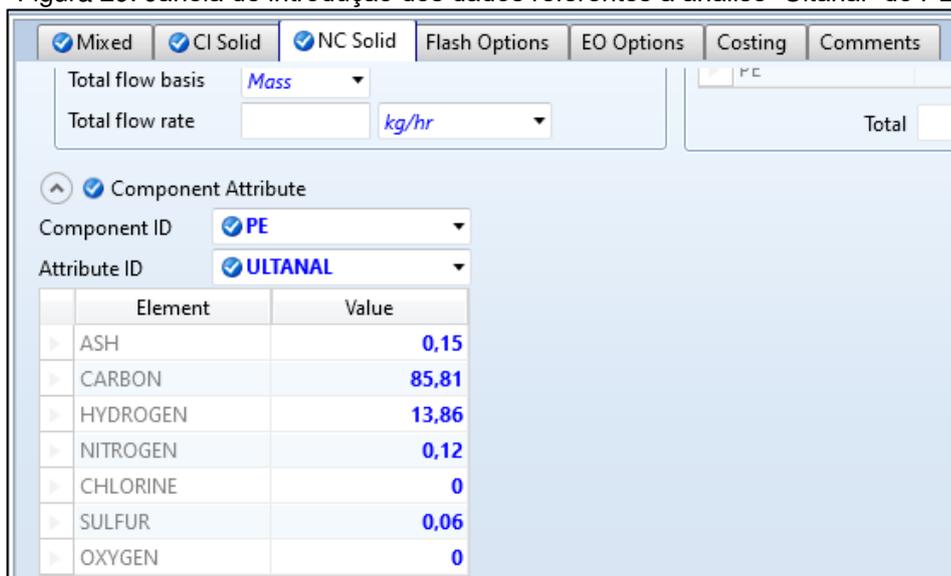
Em virtude de o polímero ser definido como um componente não convencional, além de especificar as variáveis termodinâmicas presentes e vazão de entrada é necessário inserir informações referentes a análise próxima (Figura 28) e última (Figura 29) na aba referente à componentes não convencionais.

Figura 28. Janela de introdução dos dados referentes a análise "Proxanal" do PE

The screenshot shows a software window for defining polymer feed data. The interface includes several tabs: 'Mixed', 'CI Solid', 'NC Solid', 'Flash Options', 'EO Options', 'Costing', and 'Comments'. The 'NC Solid' tab is selected. The main area contains input fields for Temperature (25 C), Pressure (1 atm), Total flow basis (Mass), and Total flow rate (kg/hr). Below these fields, there is a 'Component Attribute' section with 'Component ID' set to 'PE' and 'Attribute ID' set to 'PROXANAL'. A table lists the component analysis for PE: MOISTURE (0.02), FC (0), VM (99.85), and ASH (0.15). To the right, a summary table shows the Component (PE) with a Value of 6, and a Total of 6.

Fonte: AUTORA (2022)

Figura 29. Janela de introdução dos dados referentes a análise “Ultanal” do PE



Total flow basis: *Mass*

Total flow rate: *kg/hr*

Component Attribute

Component ID: *PE*

Attribute ID: *ULTANAL*

Element	Value
ASH	0,15
CARBON	85,81
HYDROGEN	13,86
NITROGEN	0,12
CHLORINE	0
SULFUR	0,06
OXYGEN	0

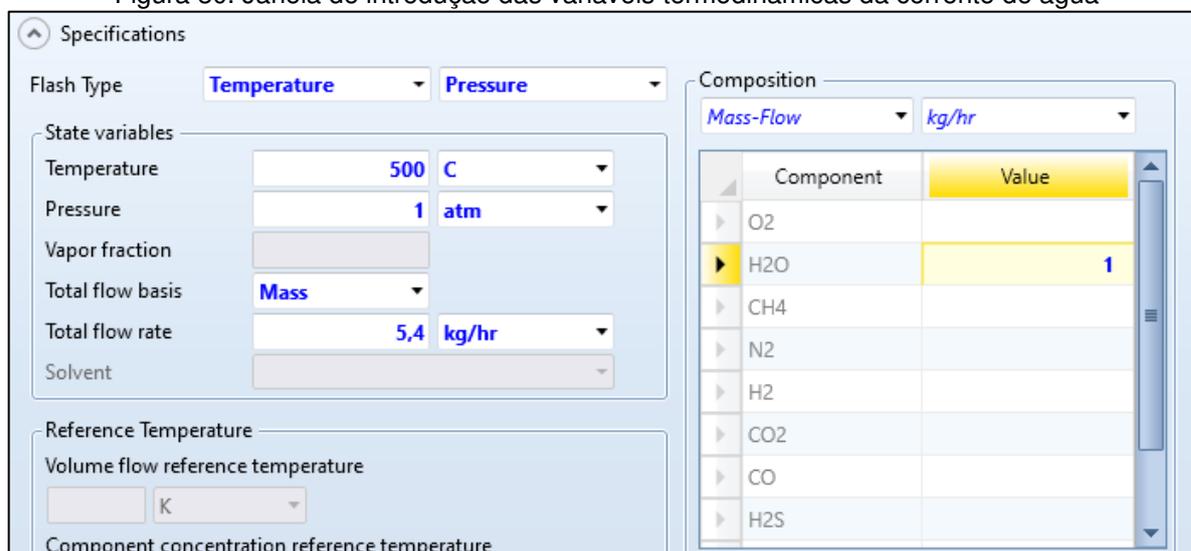
Fonte: AUTORA (2022)

5.2.6.2. Corrente de vapor

Considerando que os processos de gaseificação que utilizam vapor d'água como agente de gaseificação produzem gases com maior quantidade de hidrogênio em sua composição o que conseqüentemente produz um gás com alto PCI, o mesmo foi utilizando como agente de gaseificação para simulação do processo.

A razão vapor/combustível utilizada foi de 0,9. Na Figura 30 observa-se as variáveis termodinâmicas que foram definidas para a corrente de vapor.

Figura 30. Janela de introdução das variáveis termodinâmicas da corrente de água



Specifications

Flash Type: *Temperature* *Pressure*

State variables

Temperature: *500* *C*

Pressure: *1* *atm*

Vapor fraction:

Total flow basis: *Mass*

Total flow rate: *5,4* *kg/hr*

Solvent:

Reference Temperature

Volume flow reference temperature: *K*

Component concentration reference temperature:

Composition

Mass-Flow *kg/hr*

Component	Value
O2	
H2O	1
CH4	
N2	
H2	
CO2	
CO	
H2S	

Fonte: AUTORA (2022)

5.2.7. Definição dos blocos

5.2.7.1 Pré-tratamento – Secador

Para dimensionamento do secador foi utilizado o reator estequiométrico (RStoic) o qual é utilizado para os casos em que a estequiometria da reação é conhecida e a cinética é desconhecida. A Tabela 14 apresenta as condições operacionais do secador

Tabela 14. Condições de reação do RStoic

Variável	
Temperatura	110°C
Pressão	1 atm

Fonte: AUTORA (2022)

No RStoic uma parte da alimentação é convertida em água, a qual depende de acordo com Tungalag et al (2020) da extensão da reação conhecida como:

$$\text{Feed} \rightarrow 0,055084 \text{ H}_2\text{O} \quad (8)$$

A reação presente na Equação 8 foi introduzida no bloco RStoic (Figura 31), os coeficientes estequiométricos da mesma são ajustados automaticamente com valores negativos para os reagentes e positivos para os produtos. Deve-se ainda definir a conclusão da reação por meio da extensão da reação ou da conversão fracionária.

Figura 31. Reação do secador

The screenshot shows the configuration window for the RStoic reaction block. At the top, 'Reaction No.' is set to 1. Below, there are two tables: 'Reactants' and 'Products'. The 'Reactants' table has one entry: PE with a coefficient of -1. The 'Products' table has one entry: H2O with a coefficient of 0,0555084. At the bottom, the 'Products generation' section has two options: 'Molar extent' (unselected) and 'Fractional conversion' (selected). The 'Fractional conversion' is set to 0,2 for component PE. There are 'Next' and 'Close' buttons at the bottom.

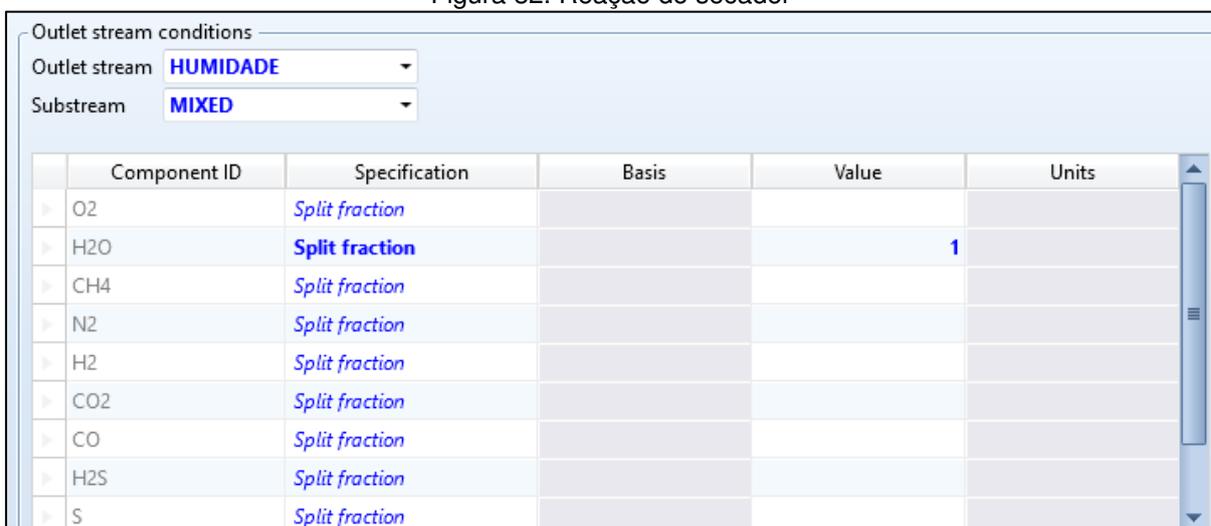
Fonte: AUTORA (2022)

A corrente resultante do processo de secagem da matéria-prima segue para o separador.

5.2.7.2. Pré-tratamento – Separador

O separador foi dimensionado com o módulo separador do Aspen Plus, no qual se especificou a separação das duas fases (Figura 32).

Figura 32. Reação do secador



Component ID	Specification	Basis	Value	Units
O2	Split fraction			
H2O	Split fraction		1	
CH4	Split fraction			
N2	Split fraction			
H2	Split fraction			
CO2	Split fraction			
CO	Split fraction			
H2S	Split fraction			
S	Split fraction			

Fonte: AUTORA (2022)

A corrente correspondente a umidade retirada da matéria-prima é direcionada para o gaseificador e a matéria-prima sem a umidade é direcionada ao reator de pirólise.

5.2.7.3. Unidade de Pirólise

A unidade de pirólise é primordial para o processo de simulação da gaseificação, visto que, o bloco selecionado para dimensionar o gaseificador não aceita compostos não convencionais, dessa forma, a unidade de pirólise decompõe a matéria-prima e a converte em compostos elementares, água e cinzas. Os referidos compostos elementares são H₂O, C (CIPSD), H₂, N₂, Cl₂, S e O₂. Além disto, Van Swaaij et al. (2004) ressalta a importância do processo de pirólise antes da

gaseificação a fim de evitar algumas dificuldades na rota da obtenção do gás de síntese.

Para dimensionamento da unidade de pirólise o reator de rendimento com rendimento do produto conhecido, o RYield, foi utilizado. O RYield permite modelar um reator a partir da especificação dos rendimentos da reação de cada componente, desta forma, convém utilizar tal modelo para os casos em que se desconhece a estequiometria e cinética da reação e quando se tem disponíveis informações referentes ao rendimento ou correlações disponíveis.

As condições de operação do reator de pirólise encontram-se na Tabela 15, assim como na Figura 33, que apresenta a janela de especificação das condições de operação do módulo.

Tabela 15. Condições de reação do Reator de pirólise

Variável	
Temperatura	500°C
Pressão	1 atm

Fonte: AUTORA (2022)

Figura 33. Janela de introdução dos dados referentes as condições de operação do reator de pirólise

The screenshot shows a software window titled 'Operating conditions'. It contains several input fields and dropdown menus. The 'Flash Type' is set to 'Temperature' and 'Pressure'. The 'Temperature' is 500 C, 'Temperature change' is K, 'Pressure' is 1 atm, 'Duty' is cal/sec, and 'Vapor fraction' is empty. The 'Valid phases' dropdown is set to 'Vapor-Liquid'.

Fonte: AUTORA (2022)

O RYield, assim como mencionado, necessita da especificação do rendimento dos produtos. Na presente simulação o rendimento do processo de pirólise foi determinado a partir de uma rotina do Fortran no bloco "calculate". Inicialmente as variáveis são definidas (Figura 34) e em sequência impõe-se a rotina no Fortran, conforme a Figura 35, para cálculo dos rendimentos.

Figura 34. Definição das variáveis para cálculo do rendimento

Variable	Information flow	Definition
▶ ULT		Compattr-Vec Stream=PE Substream=NC Component=PE Attribute=ULTANAL
▶ WATER		Compattr-Var Stream=PE Substream=NC Component=PE Attribute=PROXANAL Element=1
▶ H2O		Block-Var Block=PIROLISE Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=H2O ID2=MIXED
▶ ASH		Block-Var Block=PIROLISE Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=ASH ID2=NC
▶ C		Block-Var Block=PIROLISE Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=C ID2=CISOLID
▶ H2		Block-Var Block=PIROLISE Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=H2 ID2=MIXED
▶ N2		Block-Var Block=PIROLISE Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=N2 ID2=MIXED
▶ S		Block-Var Block=PIROLISE Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=S ID2=MIXED
▶ O2		Block-Var Block=PIROLISE Variable=MASS-YIELD Sentence=MASS-YIELD ID1=O2 ID2=MIXED

Fonte: AUTORA (2022)

Figura 35. Rotina de cálculo para conversão em base seca da composição em base úmida

Calculation method

Fortran Excel

Fortran Declarations

Enter executable Fortran statements

```

FACT=(100-WATER)/100
H2O=WATER/100
ASH=ULT (1) /100*FACT
C=ULT (2) /100*FACT
H2=ULT (3) /100*FACT
N2=ULT (4) /100*FACT
S=ULT (6) /100*FACT
O2=ULT (7) /100*FACT

```

Row: 8 Col: 25

Fonte: AUTORA (2022)

A rotina para determinação dos rendimentos baseia-se na análise última do polímero, a qual apresenta a composição em base úmida e será convertida a partir da rotina no Fortran em base seca.

Observa-se que um dos produtos formados no reator de pirólise é a cinza (ASH), composto sólido e definido como componente não convencional. Dessa forma, assim como definiu-se os atributos para o polímero na corrente de alimentação, definiu-se os atributos para o composto ASH conforme pode-se observar nas Figuras 36 e 37.

Figura 36. Janela de introdução dos dados referentes a análise “Proxanal” do ASH

Element	Value
MOISTURE	
FC	
VM	
ASH	100

Fonte: AUTORA (2022)

Figura 37. Janela de introdução dos dados referentes a análise “Ultanal” do ASH

Element	Value
ASH	100
CARBON	
HYDROGEN	
NITROGEN	
CHLORINE	
SULFUR	
OXYGEN	

Fonte: AUTORA (2022)

Além das correntes de entrada e saída, correspondentes ao fluxo de massa, existe ainda uma corrente “*Heat Stream*” que corresponde ao calor obtido a partir da decomposição no bloco RYield (reator de pirólise). Tal corrente associa o calor obtido no reator de pirólise ao bloco correspondente ao gaseificador.

A corrente resultante do processo de decomposição do polímero segue para o gaseificador.

5.2.7.4. Gaseificador

Considerando a abordagem utilizada para desenvolvimento do modelo, minimização da energia de Gibbs, analisou-se os reatores disponíveis na biblioteca do Aspen Plus.

O modelo reator de Gibbs (RGibbs) presente no Aspen Plus foi o único que apresentou a capacidade de determinar o equilíbrio sólido-líquido-vapor, ademais, ele

ainda considera os equilíbrios químicos e de fases simultâneos além de uma abordagem de equilíbrio que se baseia na temperatura, desta forma, o referido modelo de reator foi considerado o mais adequado para modelagem de um gaseificador.

No modelo de reator selecionado para simular o gaseificador é possível determinar cálculos referentes a reação sem fornecer informações a respeito de sua estequiometria ou detalhes sobre rendimento. Os cálculos realizados pelo mesmo são baseados apenas na minimização da energia de Gibbs para o sistema.

Na figura 38 é possível observar a entrada de dados referentes as variáveis termodinâmicas do reator de Gibbs utilizado para simular o gaseificador.

Figura 38. Janela de especificações das variáveis termodinâmicas do gaseificador

Calculation option
Restrict chemical equilibrium - specify temperature approach or reactions

Operating conditions

Pressure 5 atm

Temperature 800 C

Heat Duty cal/sec

Phases

Maximum number of fluid phases

Maximum number of solid solution phases 0

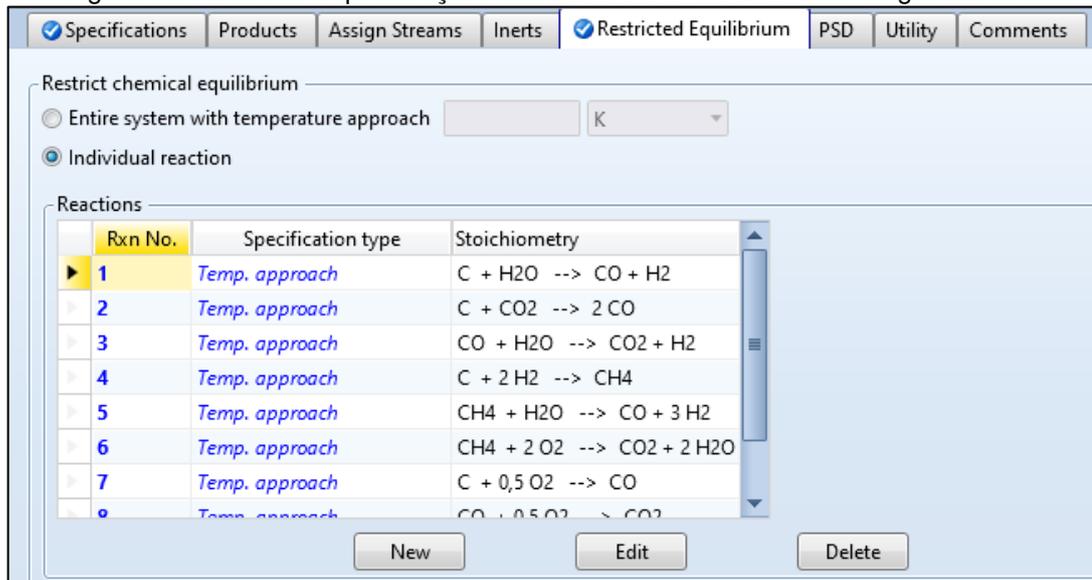
Include vapor phase

Merge all CISOLID species into the first CISOLID substream

Fonte: AUTORA (2022)

As condições de equilíbrio restrito foram selecionadas para o gaseificador, dessa forma, as reações de equilíbrio foram anexadas na guia equilíbrio restrito conforme a figura 39.

Figura 39. Janela de especificações das variáveis termodinâmicas do gaseificador



Fonte: AUTORA (2022)

5.3 RESULTADOS E DISCURSSÕES

A convergência do processo modelado foi alcançada e os resultados referentes ao gás obtido (gás de síntese) e sua constituição encontram-se na figura 40.

Figura 40. Constituição do Gás obtido no processo de gaseificação simulado

- Mole Flows	kmol/hr	0,707355
O2	kmol/hr	4,9761e-24
H2O	kmol/hr	0,168184
CH4	kmol/hr	0,118612
N2	kmol/hr	0,000205574
H2	kmol/hr	0,290866
CO2	kmol/hr	0,0688271
CO	kmol/hr	0,0605711
H2S	kmol/hr	8,97968e-05
S	kmol/hr	1,51327e-16

Fonte: AUTORA (2022)

Com base nos dados presentes na figura 40, referentes a constituição do gás obtido no processo de gaseificação, observa-se que a partir de um resíduo sólido à base de polietileno obtém-se uma mistura de gases os quais são constituídos de compostos de alto valor agregado a exemplo do metano e hidrogênio, largamente utilizados como combustíveis.

5.3.1. Validação do modelo

Com a finalidade de validar o modelo desenvolvido no Aspen Plus, o produto obtido, o gás de síntese, seu rendimento, composição e propriedades foram confrontadas com resultados obtidos em testes experimentais realizados utilizando como matéria-prima da gaseificação polímeros e em condições semelhantes.

5.3.1.1. Produto

O processo de gaseificação do polímero simulado no Aspen Plus apresentou convergência e resultados para material volátil próximos a 99% e para cinzas abaixo de 1%. Os resultados supracitados corroboram com os resultados experimentais obtidos por Wilk e Hofbauer (2013) que também obteve material volátil próximos a 99% e para cinzas abaixo de 1% no processo de gaseificação a vapor de diferentes materiais poliméricos em uma planta piloto de gaseificação de leito fluidizado duplo. Os resultados alcançados por He et al (2009), obtidos a partir da gaseificação catalítica a vapor de resíduos poliméricos também apresentou um produto com aproximadamente 99,85% de material volátil e 0,15% de cinzas.

5.3.1.2. Concentração de H₂ E CH₄

Dentre os gases constituintes do gás obtido no processo de gaseificação os principais e de maior interesse são o H₂ e o CH₄. Vale ressaltar uma das hipóteses do modelo simulado, a qual desconsidera a hidrodinâmica do reator bem como a cinética das reações que ocorrem no gaseificador, posto que o mesmo se baseia no modelo de equilíbrio de Gibbs, por consequência supõe-se que as concentrações de H₂ e CH₄ sejam mais elevadas em comparação aos dados experimentais.

A partir das tabelas 16 e 17 e dos gráficos 1 e 2 é possível observar o comparativo das concentrações de H₂ e CH₄ no gás de síntese do processo simulado com dados experimentais do processo de gaseificação do PE/polímeros à vapor e em condições de temperatura iguais ou próximas as condições do processo simulado (800°C/850°C).

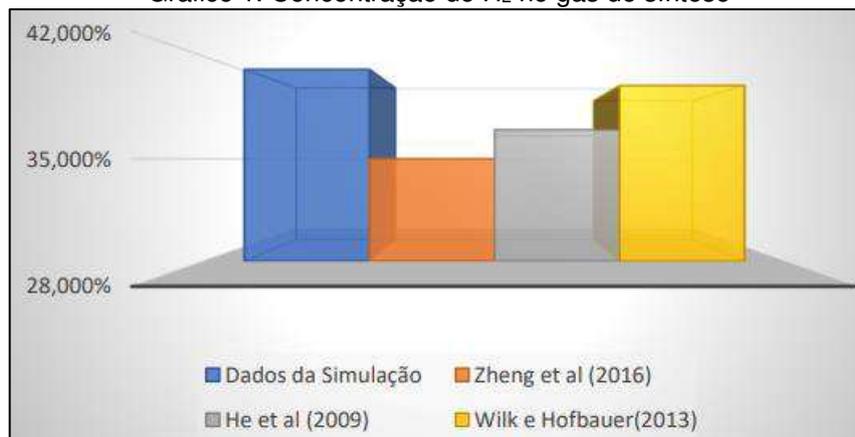
Os resultados dos processos de gaseificação a vapor do PE e de uma mistura de plásticos realizados por Wilk e Hofbauer (2013), assim como a gaseificação a vapor do PE realizada por Zheng et al (2016) foram referência para o comparativo e validação do modelo. Os resultados de He et al (2009), que realizaram a gaseificação a vapor (catalítica e não catalítica) de resíduos de polietileno também foram base para comparação e validação do modelo.

Tabela 16. Concentração de H₂ no gás de síntese

Referência	H ₂ no gás obtido
Dados da Simulação	41,11%
Zheng et al (2016)	35%
He et al (2009)	36,98%
Wilk e Hofbauer(2013)	Cerca de 40% (PE puro)

Fonte: ZHENG ET AL (2016), HE ET AL (2009) E WILK E HOFBAUER (2013)

Gráfico 1. Concentração de H₂ no gás de síntese



Fonte: ZHENG ET AL (2016), HE ET AL (2009) E WILK E HOFBAUER(2013)

Tabela 17. Concentração de CH₄ no gás de síntese

Referência	CH ₄ no gás obtido
Dados da Simulação	16,76%
Zheng et al (2016)	Aproximadamente 15%
He et al (2009)	14,87%
Wilk e Hofbauer(2013)	Aproximadamente 15% (para mistura de plásticos)

Fonte: ZHENG ET AL (2016), HE ET AL (2009) E WILK E HOFBAUER(2013)

Gráfico 2. Concentração de CH₄ no gás de síntese

Fonte: ZHENG ET AL (2016), HE ET AL (2009) E WILK E HOFBAUER(2013)

A partir dos resultados referentes a composição do gás de síntese obtido e do comparativo com dados experimentais é possível constatar uma boa consonância com os resultados experimentais do processo de gaseificação com vapor e com uma matéria-prima de mesma natureza.

5.3.1.3. Desempenho do processo

Com a finalidade de averiguar o desempenho do processo de gaseificação e qualidade do gás de síntese obtido o PCI do gás foi analisado. O PCI do gás obtido no processo simulado no Aspen Plus foi 10,98 MJ/m³, tal valor classifica-o, de acordo com Nogueira e Lora (2003), um gás de alto poder calorífico visto que, um gás com um PCI entre 10 e 40 MJ/m³ apresenta a referida classificação.

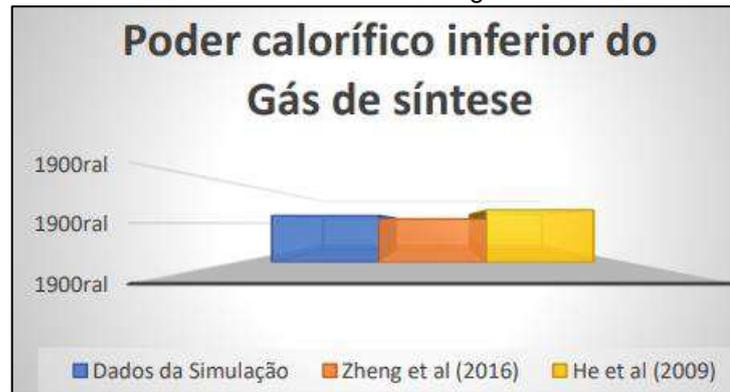
Na tabela 18 e no gráfico 3 é possível dados experimentais referentes aos PCI de gases obtidos em processos sob condições semelhantes ao processo simulado, assim como o PCI do gás obtido na simulação.

Tabela 18. Poder Calorífico do gás de síntese

Referência	Poder calorífico (MJ/m ³)
Dados da Simulação	10,98
Zheng et al (2016)	10,54
He et al (2009)	11,67

Fonte: ZHENG ET AL (2016), HE ET AL (2009)

Gráfico 3. Poder Calorífico do gás de síntese



Fonte: ZHENG ET AL (2016), HE ET AL (2009)

É possível observar a concordância entre os resultados experimentais e os resultados obtidos na simulação dada à similaridade do PCI dos gases.

Além de avaliar o PCI do gás, a eficiência a frio do gás (CGE) foi determinada, a mesma é um parâmetro termodinâmico e permite analisar a efetividade do processo de gaseificação, de acordo com Syed et al. (2012) este parâmetro determina o valor energético do gás obtido em relação à potência térmica da matéria-prima, ou seja, permite determinar qual a fração de matéria-prima alimentada no gaseificador que poder ser utilizada como energia utilizando o gás de síntese produzido. A CGE do gás foi determinada de acordo com Násner (2015) segundo a equação 9.

$$CGE = \frac{PCI_{gas} F_{gas}}{PCI_{feed} F_{feed}} \quad (9)$$

Na equação 9 F é a vazão mássica em kg/h, PCI é o poder calorífico inferior em MJ/kg e “*feed*” é a matéria-prima alimentada no gaseificador.

A eficiência a frio do gás foi 69,45%, valor similar foi encontrado na pesquisa de He et al (2009), entretanto é válido ressaltar que, em condições de equilíbrio espera-se um maior rendimento do gás em relação ao processo na prática, o que consequentemente ocasiona um aumento na CGE.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da similaridade dos resultados obtidos no modelo computacional com dados experimentais extraídos da literatura é possível afirmar que o modelo proposto

é verossímil e pode ser aplicado como uma alternativa para análises quantitativas e qualitativas do processo de gaseificação para conversão de polímeros em gás de síntese.

Outrossim, observa-se que, o processo de gaseificação possibilita a conversão de resíduos poliméricos em uma mistura de gases de compostos com alto valor agregado, a exemplo do hidrogênio e metano, que são gases combustíveis, além de apresentar um alto PCI ($10,98 \text{ MJ/m}^3$) o que permite constatar o seu potencial energético.

Quando comparado ao produto final do processo de pirólise, observa-se maior aplicabilidade do produto obtido no processo de gaseificação, isto devido ao mesmo permitir várias rotas químicas, o que é uma vantagem significativa do processo de gaseificação em relação ao processo de pirólise.

O produto final e sua aplicabilidade enquadram-se nos objetivos gerais da presente pesquisa, que visa a recuperação energética da matéria-prima, logo, é importante o estudo da possível aplicação do mesmo.

5.5. REFERÊNCIAS

HE, M., XIAO, B., HU, Z., LIU, S., GUO, X., & LUO, S. **Syngas production from catalytic gasification of waste polyethylene: Influence of temperature on gas yield and composition.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 34, n. 3, p. 1342-1348, 2009. Acesso em 12 Dez. 2021. Disponível em < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908016844?casa_token=L67vBx74J-sAAAAA:KB1dMCDa76PRsCRuXNxlbnacPou1ii6PqZE3ldOysDEdSuH7DJlgHhSxK1ZfSsqsiDDIsck-64 >

KANNAN, PRAVIN; AL SHOAIBI, AHMED; SRINIVASAKANNAN, C. **Optimization of waste plastics gasification process using aspen-plus.** Gasification for Practical Applications, 2012. Acesso em 21 Mai. 2021. Disponível em < <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ABSeDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA279&dq=Optimization+of+waste+plastics+gasification+process+using+aspen-plus.&ots=A-onCdJ3J2&sig=snx-IXtX3AylGWOht2ECy28kCpA#v=onepage&q=Optimization%20of%20waste%20plastics%20gasification%20process%20using%20aspen-plus.&f=false> >

NÁSNER, ALBANY MILENA LOZANO. **Modelagem de uma Planta Piloto de Gaseificação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) em um Sistema Integrado a Motor Ciclo Otto, Utilizando o Software Aspen Plus™.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Itajuba, Minas Gerais, 2015. Acesso em 1 de Out. 2021. Disponível em < <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/474>>

NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NENO, L. O. G. Desenvolvimento de um Protótipo de Simulação de um Motor HCCI. 2009. Relatório de Iniciação Científica (Graduação em Engenharia Mecânica) – PUC Rio. Rio de Janeiro. 2009. Acesso em 11 Fev. 2022. Disponível em < https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpq/pibic/relatorio_resumo2009/relatorio/mec/lucas_oliveira.pdf >

TUNGALAG, A., LEE, B., YADAV, M., & AKANDE, O. **Yield prediction of MSW gasification including minor species through ASPEN plus simulation.** Energy, v. 198, p. 117296, 2020. Acesso em 12 Out. 2021. Disponível em < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220304035?casa_token=o6h0nhcuOd8AAAAA:tD_F8TPORON2CzemDQ2hFjSihf4zQ07D9m3qy8a4prKRvNLAPXg2tRmtlRQAryb8HSa_CzPxz6Y >

SYED, SHABBAR; JANAJREH, ISAM; GHENAI, CHAOUKI. **Thermodynamics equilibrium analysis within the entrained flow gasifier environment.** International Journal of Thermal and Environmental Engineering, v. 4, n. 1, p. 47-54, 2012. Acesso 03 Nov. 2021. Disponível em < <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30204516/ijtee20120401047054-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1644761278&Signature=XDLZ-YYP-->

[Whra5~0Xwit5FMILdK54lpPsYqAbW9E~Fs6FKFS1fkS6eKkT5uyoAsWnNygZ4iRCP
C81ooSfLpgmSRAZleS0oF6ja3lag302GSdyNJw~e0cm4TAvGHEBkxAToTdIEL7dsH
dxaDzkBjNqH~ics59MPuhQvwLREbVz3ozrgeERVJ7bGYAKSDrno~rzZn06h35TnjqY
leCKjgVvkd5Np1CF9h3Yt8l-
Njr5DZmoUyq~x2dy55I9idSsC~cGniv2~3XsGHWUjp3OUGRp3F-
W~Q2AMGEFFd7qsG~evCojiH7zEhJgl0YVnKfYttZVCi41cp-
gRgeWzkVYh6ww &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA >](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611300077X?casa_token=oYk9bFY4VpsAAAAA:5K_HYyqECOGR9IOheIXV3bkhGDkiPlz6Vtv1Nt6U1b86YweFcTVoZEIRdgfWxTwmrH2T3Ze6lc)

WILK, V.; HOFBAUER, H. **Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier.** *Fuel*, v. 107, p. 787-799, 2013. Acesso em 28 Dez. 2021. Disponível em https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611300077X?casa_token=oYk9bFY4VpsAAAAA:5K_HYyqECOGR9IOheIXV3bkhGDkiPlz6Vtv1Nt6U1b86YweFcTVoZEIRdgfWxTwmrH2T3Ze6lc >

Zheng, X., Chen, C., Ying, Z., & Wang, B. **Experimental study on gasification performance of bamboo and PE from municipal solid waste in a bench-scale fixed bed reactor.** *Energy Conversion and Management*, v. 117, p. 393-399, 2016. Acesso 03 Nov. 2021. Disponível em < https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Experimental+study+on+gasification+performance+of+bambo+and+PE+from+municipal+solid+waste+in+a+bench-scale+fixed+bed+reactor+Xiaoy&btnG= >

CAPÍTULO 6 | PLANTA DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA

O maior interesse é a aplicabilidade e viabilidade da utilização do produto obtido no processo de gaseificação dos resíduos poliméricos. Dentre as aplicabilidades do gás de síntese encontra-se a geração de energia a qual, apensar de apresentar viabilidade no que concerne aos fatores ambientais requer otimização em relação aos fatores econômicos. Entretanto, um marco importância e que permite mudança nesse cenário, tornando as tecnologias de conversão térmica no tratamento de resíduos mais rentáveis é a Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que permite a conexão à rede de distribuição desde que a capacidade seja até 1MW.

Nessa perspectiva e considerando ainda as recomendações da legislação no que se refere aos RSU, as autorizações da ANEEL e atentando para as novas diretrizes de planejamento energético como a descentralização da produção, possível conjecturar cenários promissores acerca da utilização em larga escala e viabilidade dos modelos de waste-to-Energy (WtE), ou seja, modelos que utilizam resíduos para produção de energia, mais especificamente, no caso da presente pesquisa, utilizando as tecnologias de conversão térmica.

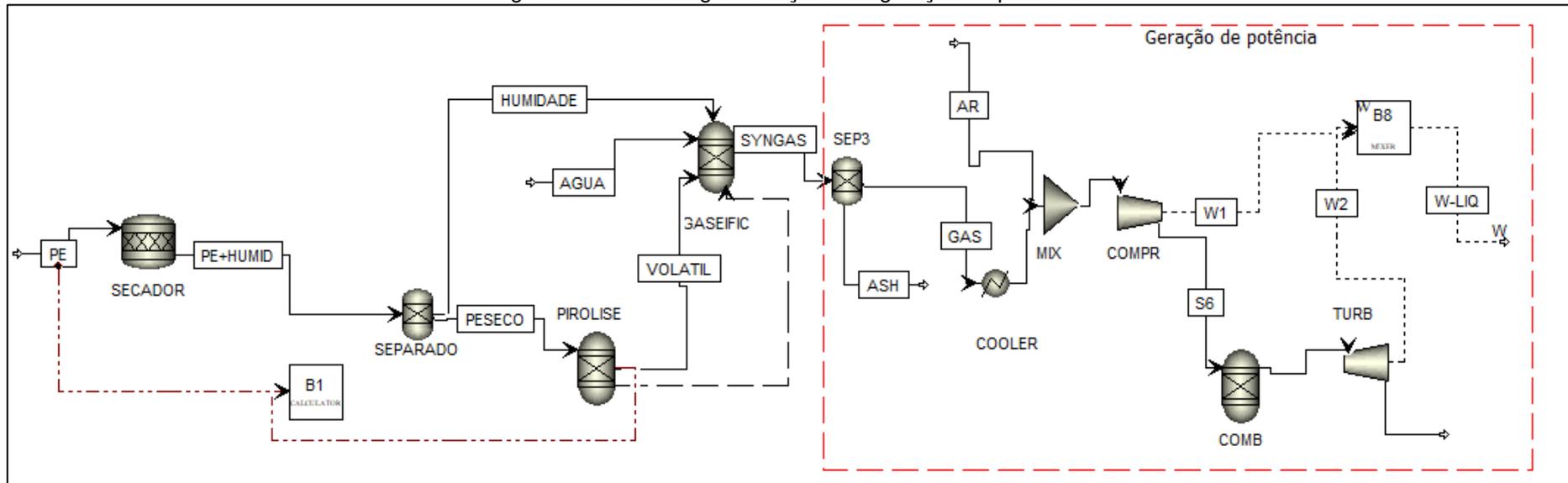
Visando a aplicação do gás de síntese na produção de energia e a possível recuperação energética dos resíduos poliméricos a partir do processo de gaseificação, o gás de síntese obtido, após tratamento adequado, pode ser inserido em uma máquina de combustão interna.

Nesse sentido, o presente capítulo concentra-se na análise do trabalho líquido fornecido pelo gás de síntese obtido no modelo proposto e descrito no capítulo V. Para isto, foi integrado ao modelo de gaseificação proposto um modelo de motor de combustão interna ciclo Otto, o qual, será apresentado a seguir.

6.1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A planta de geração de energia foi modelada no Aspen Plus e integrada ao processo de gaseificação, assim como pode-se observar na Figura 41.

Figura 41. Planta de gaseificação e de geração de potência



Fonte: AUTORA (2022)

O gás de síntese passa por um processo de separação afim de eliminar os resíduos remanescentes – carbono e cinzas – e em seguida segue para a planta de geração de energia.

A planta de geração de potência é dividida em: arrefecimento do gás de síntese (cooler), mistura do ar e o gás combustível (MIX), compressão (COMPR), combustão (COMB) e expansão (TURB) dos gases de combustão. Além dos blocos utilizados para simular equipamentos constituintes do MCI, existe ainda o bloco de soma que permite avaliar o trabalho útil (W-LIQ).

6.2. ETAPAS DO PROCESSO

6.2.1. Resfriamento Do Gás

Os gases provenientes do processo de gaseificação deixam o gaseificador com temperaturas elevadas, dessa forma, é necessário de acordo Násner (2015) o arrefecimento do gás com a intenção de diminuir a energia que o compressor consome, aumentar a densidade de energia do gás, otimizar o custo de operação e manutenção do compressor.

O autor supracitado menciona ainda que o gás deve entrar no motor em uma temperatura inferior ou próxima a 80°C, esta temperatura, uma vez que diminui a densidade do gás, faz com que o mesmo seja um combustível adequado e eficaz para combustão no interior do motor.

O bloco *Heater* foi utilizado para simular o sistema de arrefecimento na planta de geração de potência.

6.2.2. Mistura ar/combustível

O bloco *Mix* disponibilizado pelo Aspen Plus foi utilizado para produzir uma mistura do gás de síntese com ar (que mistura deve ser a mais homogênea possível). O referido bloco tem a função de unir fluxos convertendo-os em um único fluxo, a temperatura da corrente final é definida de acordo com um modelo de equilíbrio adiabático dos fluxos de alimentação.

6.2.3. Compressão

Na etapa de compressão da mistura ar/combustível utilizou-se o bloco compr. disponível na biblioteca do Aspen Plus, mais especificamente na categoria variantes de pressão. O referido bloco foi utilizado para simular a compressão adiabática de um MCI.

6.2.4. Combustão

O reator de Gibbs, RGibbs, foi utilizado para simular a câmara de combustão do motor de combustão interna ciclo Otto. o bloco supracitado, assim como já mencionado, baseia-se na minimização da energia livre de Gibbs e na planta de geração de potência, ele simula o acréscimo isocórico de calor do MCI.

6.2.5. Expansão

Na última etapa do motor de combustão de ciclo Otto os gases provenientes da combustão são direcionados para uma turbina. O bloco compr. utilizado na planta de geração de potência para modelar o compressor e conseqüentemente a compressão da mistura ar/combustível é igualmente capaz de ser utilizado na modelagem de turbinas de estágio simples. Diante disto, utilizou-se novamente o bloco compr. para modelar a expansão adiabática do MCI, produzindo os gases de exaustão.

6.2.6. Cálculo do trabalho útil

O bloco Mix supramencionado e já utilizado na planta de geração de potência que tem a finalidade de transformar fluxos de matéria em apenas um fluxo também pode ser utilizado com o propósito de unir fluxos de calor e trabalho. Isto posto, para obtenção da potência líquida produzida pelo motor utilizou-se o bloco mix para os fluxos de entrada referente ao trabalho consumido no compressor e o trabalho gerado na turbina, os quais foram transformados em um único fluxo, fornecendo dessa maneira o trabalho líquido produzido pelo motor.

Uma vez que o trabalho líquido informa a quantidade de energia possível de ser recuperada a partir da gaseificação dos resíduos poliméricos o mesmo é o principal parâmetro do processo.

6.3. RESULTADOS

A partir de uma vazão de 113 kg/h de resíduos polimérico foi possível a obtenção de um trabalho líquido (corrente W-LIQ) igual a 72,96 kW.

A eficiência da planta de geração de energia foi investigada a partir de seu rendimento, determinado segundo Ferreira e Marin (2018) e de acordo com a equação 10. Çengel e Boles (2006) ressalta que o rendimento é também considerado a eficiência do ciclo, a mesma traduz o êxito do ciclo em converter calor em trabalho.

$$\%rendimento = \frac{\text{trabalho}_{\text{líquido}}}{\text{Calor}_{\text{fornecido}}} * 100 \quad (10)$$

Na equação 10, o trabalho líquido é o valor obtido na corrente W-LIQ e o calor fornecido é o calor proveniente da combustão, isto é, o produto entre a entalpia de combustão e sua vazão.

A quantidade de calor fornecida pela combustão durante o processo foi igual a 300144 kcal/h e o trabalho líquido (corrente W-LIQ) foi igual a 72,96 kW que corresponde a 62732.29 kcal/h, assim o rendimento foi igual a 20,9 %.

Çengel e Boles (2006) ressaltam que normalmente o rendimento dos motores de combustão interna por centelha (motores ciclo Otto) é relativamente baixo. Neno (2009) menciona que os motores Otto possuem um rendimento de cerca de 22% a 30%. De acordo com Násner (2015) os MCI que operam com gases obtidos a partir do processo de gaseificação operam com rendimento entre 20-25%.

Perante o exposto no que concerne ao rendimento dos MCIs ciclo Otto, principalmente funcionando com gás de gaseificação, a eficiência do ciclo de Otto simulado apresenta concordância com dados presentes na literatura.

6.4 CONCLUSÃO

O modelo da planta de geração de potência integrado ao modelo do processo de gaseificação anteriormente validado e proposto apresentou-se coerente com os

dados presentes na literatura, dessa forma, pode-se concluir que o modelo proposto no presente capítulo permite avaliar de forma quantitativa e qualitativa o processo de conversão de polímeros em eletricidade.

Entretanto, vale destacar a necessidade da investigação técnico-econômica da gaseificação dos resíduos de polímeros para alimentação do motor de combustão interna em conjunto com sua sustentabilidade ambiental.

6.5. REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A., **Termodinâmica**. São Paulo, McGraw-Hill, 5 ed., 2006.

FERREIRA N.L. e MARIN M. P. A. Modelo De Um Ciclo Otto Com Um Simulador De Processos", p. 2515-2518 . In: São Paulo: Blucher, 2018. Acesso em 01 Fev. 2022. Disponível em < <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobeq2018/PT.0667.pdf> >

NÁSNER, ALBANY MILENA LOZANO. **Modelagem de uma Planta Piloto de Gaseificação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) em um Sistema Integrado a Motor Ciclo Otto, Utilizando o Software Aspen Plus™**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Itajuba, Minas Gerais, 2015. Acesso em 1 de Out. 2021. Disponível em < <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/474> >

CAPÍTULO 7 | ESTUDO DE CASO DA GASEIFICAÇÃO APLICADA AOS RSU DO ASCG

Embora a presente pesquisa concentre-se na análise e propositura das tecnologias de conversão térmica como uma alternativa para gerenciamento e recuperação dos RSU (mais especificamente dos resíduos poliméricos) de forma geral, um estudo de caso referente a aplicação das tecnologias de conversão térmica para obtenção de produtos de alto valor agregado a partir dos resíduos poliméricos presentes no Aterro sanitário de Campina Grande (ASCG) foi realizado.

O presente capítulo apresenta o estudo de caso realizado, o qual teve como base os dados históricos referentes à disposição de RSU no ASCG e os resultados obtidos nos processos de pirólise e gaseificação de polímeros modelados na presente pesquisa.

Nos processos simulados foi utilizado um polímero de referência para representar as características dos mesmos, dessa forma, para desenvolvimento do estudo de caso foi considerado que os resultados alcançados nos processos de pirólise e gaseificação simulados são coerentes para todas as categorias de polímeros existentes.

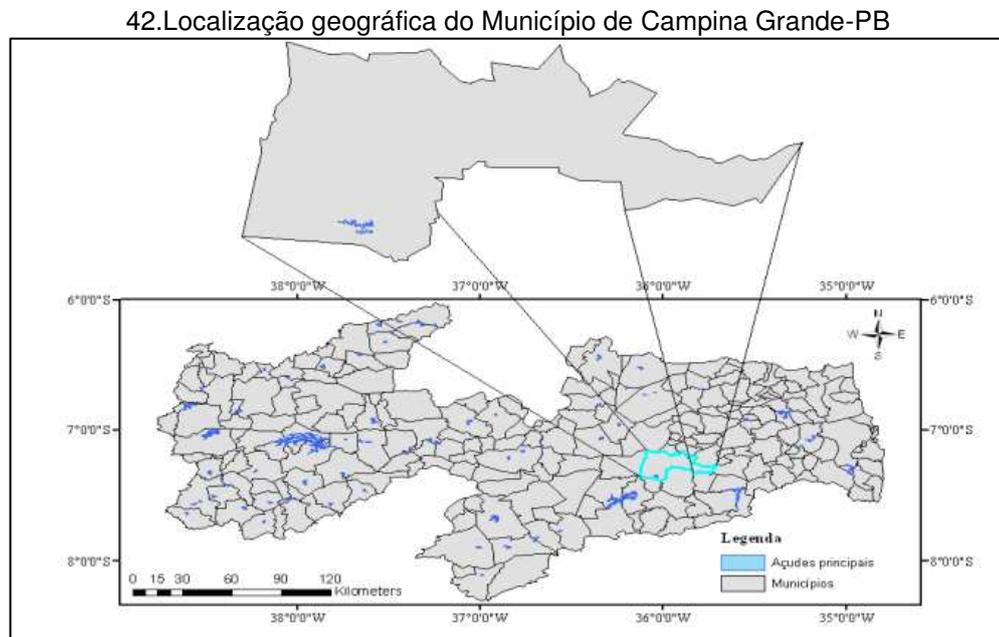
O estudo de caso se concentra no estudo da localidade e do potencial energético nela presente. Ele consiste na análise e inferência no que se refere ao tratamento e conversão dos resíduos de polímeros dispostos no ASCG, assim como na projeção de cenários futuros nos quais, o sistema de gaseificação ou de pirólise é utilizado no tratamento de resíduos poliméricos dispostos na referida localidade.

O objetivo do estudo foi analisar o grande potencial energético dos rejeitos de polímeros dispostos no ASCG, seu desperdício e o quanto as tecnologias de conversão térmica podem aproveitar tal potencial, em paralelo, o estudo de caso analisa ainda a comercialização dos resíduos recicláveis - vidro, metal, papel e papelão – estimando o valor econômico associado aos mesmos.

7.1. CARACTERIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo de caso realizado se refere aos RSU dispostos do aterro sanitário de Campina Grande – PB. O referido município localizado, de acordo com IBGE (2017), à Região Geográfica Imediata de Campina Grande e à Região Geográfica Intermediária de Campina Grande destina seus resíduos sólidos urbanos para o aterro

sanitário de Campina Grande (ASCG). A figura 42 apresenta a localização geográfica da cidade de Campina Grande.

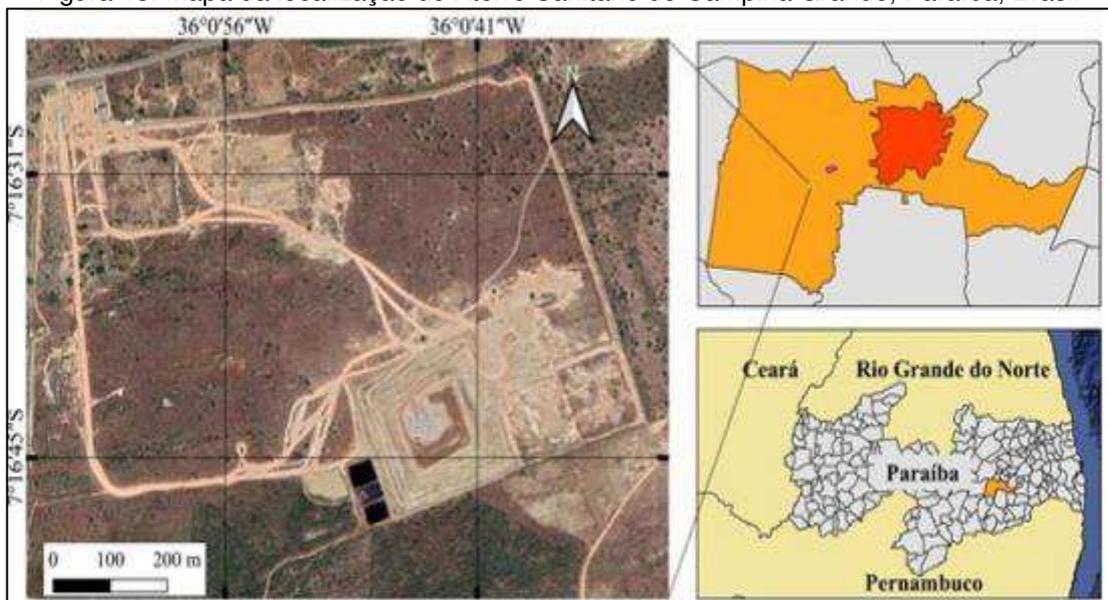


Fonte: MACEDO, GUEDES e SOUZA (2017)

Campina Grande apresenta uma população de 385.213 habitantes e sua área é cerca de 621 km², sendo 96 km² de área Urbana. A população estimada para o ano de 2021 é de 413.830 habitantes (IBGE, 2021).

A figura 43 apresenta a localização geográfica do aterro sanitário de Campina Grande, área foco do estudo de caso.

Figura 43. Mapa da localização do Aterro Sanitário de Campina Grande, Paraíba, Brasil



Fonte: adaptado de CEZÁRIO (2022)

O aterro sanitário de Campina Grande localiza-se na fazenda Logradouro, zona rural do distrito Catolé e Boa vista na cidade de Campina Grande-PB, mais precisamente sua localização tem as coordenadas UTM 829172 e 9194834 e uma área de 60 há (ARAÚJO NETO et al., 2019).

As operações do Aterro Sanitário de Campina Grande, de acordo com Araújo Neto (2019), iniciaram em 2015 com vida útil estimada de 25 anos, ele é um empreendimento privado e sua administração é competência da ECOSOLO GESTÃO AMBIENTAL LTDA, dessa forma, por não se tratar de um aterro municipal, o ASCG não recebe apenas resíduos da cidade de Campina Grande.

O ASCG é constituído de 22 células de 21 metros de altura e uma área de 1 hectare cada célula, as quais apresentam uma geometria piramidal, onde o resíduo é confinado. O aterro apresenta um sistema de camadas formado por uma mistura de solo (pertencente a jazidas próximas ao aterro) e bentonita, porém nas camadas intermediárias, o solo é utilizado sem adição de bentonita. Existe ainda um sistema de drenagem horizontal do lixiviado no formato de espinha de peixe (GURJÃO, NETO E PAIVA, 2020).

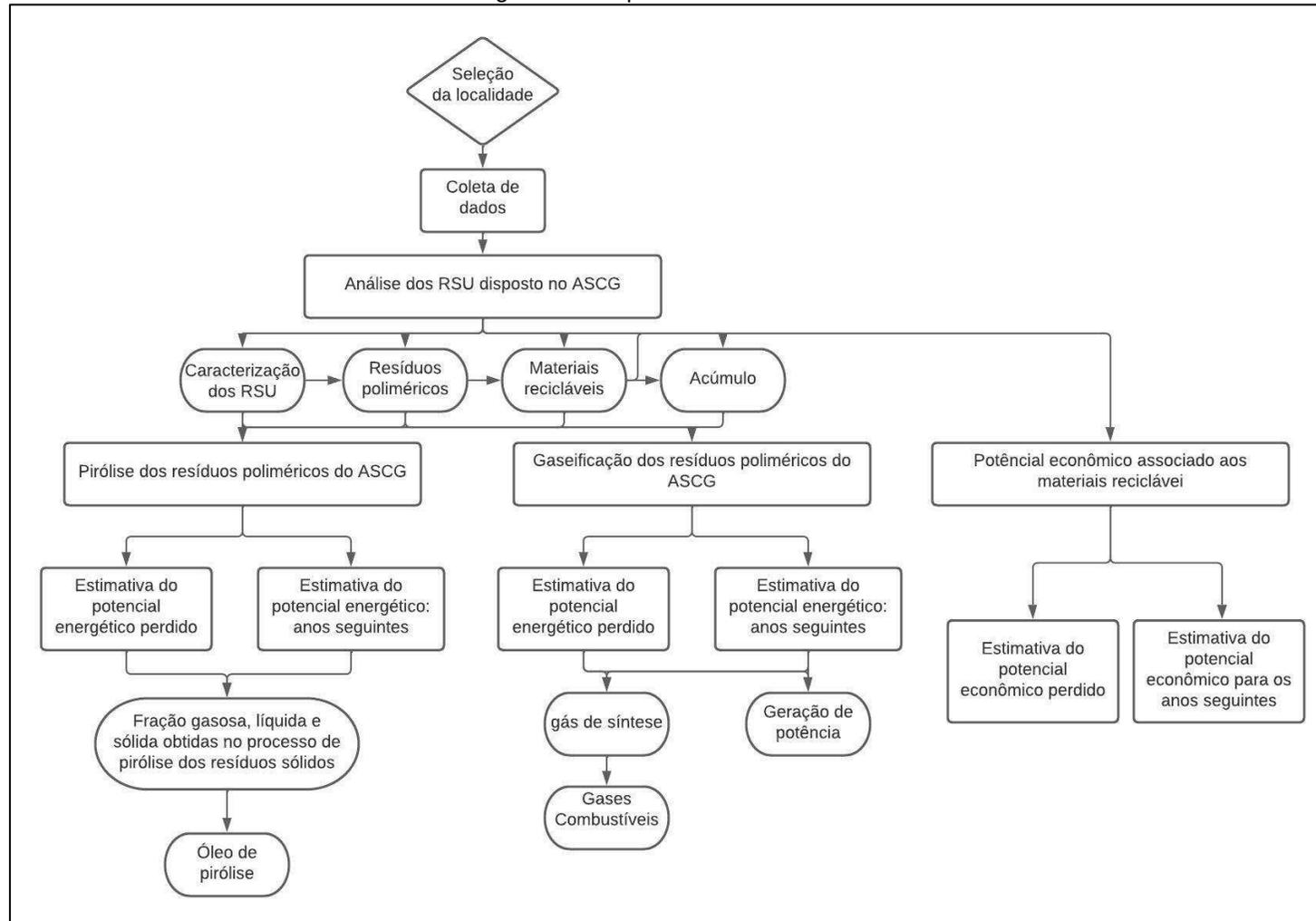
7.2 METODOLOGIA

Como é possível observar na figura 44, o estudo de caso teve início a partir da seleção da localidade, considerando a disponibilidade de dados e representatividade no que se refere a gestão de resíduos da maioria dos centros urbanos brasileiros. Em seguida foi realizado um levantamento de dados dos RSU dispostos na localidade selecionada, os quais possibilitaram, associados aos resultados obtidos nos processos simulados, realizar as etapas seguintes do estudo de caso.

Seguidamente, foram realizadas análises e inferências no que concerne aos RSU presentes no ASCG, assim como no tratamento dos resíduos de polímeros a partir do processo de pirólise e gaseificação. Foram também realizadas análise e inferências referentes aos resíduos recicláveis dispostos no ASCG.

O estudo de caso foi realizado em etapas, as quais encontram-se no fluxograma presente na figura 44.

Figura 44. Etapas do estudo de caso



Fonte: Autora (2022)

7.2.1 Seleção da localidade

Seguindo os objetivos gerais da presente pesquisa, o estudo de caso foi realizado com a finalidade de analisar as tecnologias de conversão térmica estudadas para a conversão de resíduos poliméricos em uma determinada localidade. Para isto, é necessário a disponibilidade de dados que permitam realizar estimativas próximas a realidade.

Além disto, a escolha da localidade considerou o quanto o local aproxima-se a realidade dos centros urbanos no que se refere a gestão de RSU. Considerou-se ainda a composição gravimétrica dos RSU da localidade, visto que, esse parâmetro revela o potencial de geração de produtos de alto valor agregado dos mesmos.

7.2.2 Coleta de dados

Para desenvolver o estudo de caso foi necessário o conhecimento da localidade selecionada, bem como, dos RSU dispostos, seu histórico e principalmente sua situação atual. Para esta finalidade, um levantamento de dados referentes ao ASCG, localidade selecionada, e seus RSU foi realizado. O levantamento de dados compreendeu o período de início de duas atividades, agosto de 2015 até agosto de 2021.

7.2.3 Análise dos RSU dispostos no ASCG

7.2.3.1 Estimativa do acúmulo de RSU no ASCG

Entre as formas adequadas de disposição final dos RSU do Brasil, encontram-se os aterros sanitários, os quais dispõem de um sistema para compactação, cobertura, impermeabilização, drenagem e tratamento dos resíduos.

Como todo aterro sanitário o ASCG utiliza dos princípios da engenharia para disposição adequada dos RSU, dessa forma, os RSU acabam acumulados no mesmo, visto que não são destinados a nenhum outro processo de reaproveitamento como compostagem, reciclagem e etc.

A partir dos dados coletados referentes as quantidades de RSU dispostas no ASCG, estimou-se a quantidade de resíduos acumulados desde o início de suas atividades, desconsiderando os materiais que já sofreram decomposição. A estimativa de RSU acumulados foi realizada a partir da determinação da frequência acumulada das quantidades mensais dos RSU dispostos no ASCG no período de agosto de 2015 a agosto de 2021.

7.2.3.2 Projeção e acúmulo das quantidades de RSU dispostos no ASCG até 2026

A localidade selecionada para estudo de caso deve disponibilizar quantidade de RSU suficiente para conversão de seus resíduos em produto de alto valor agregado, a exemplo de gás de síntese, assim sendo, é fundamental conhecer as quantidades presentes no mesmo, bem como se o aterro irá, futuramente, manter tais quantidades.

Ademais, é importante a análise da quantidade de RSU dispostos no aterro, visto que a mesma influencia diretamente na sua vida útil além de revelar a realidade de materiais recicláveis e seu desperdício sua simples disposição. Isto posto, com base no histórico de dados referentes a disposição de RSU no ASCG, foi realizada uma previsão dos RSU dispostos no ASCG até o ano de 2026.

A previsão foi feita no *software microsoft excel*, o qual, a partir de dados históricos temporais gera uma planilha com valores históricos e previstos, permitindo observar a tendência das quantidades de RSU que serão recebidas pelo aterro.

A planilha de previsão no referido *software* é gerada a partir de dados baseados no tempo e do algoritmo ETS (suavização exponencial) versão AAA. A planilha de previsão gerará projeções futuras, com um intervalo de confiança de 95% e a partir dela é possível visualizar também os limites de confiança inferior e superior, ou quais possibilitam observar o quanto os dados variam em relação ao valor previsto.

A partir das previsões realizadas no que se refere ao quantitativo de RSU dispostos no ASCG até 2026, mensurou-se também as quantidades de resíduos sólidos urbanos que irão acumular-se no ASCG até o ano de 2026.

Para tal finalidade a partir da estimativa dos RSU dispostos no aterro até o ano de 2026, a qual é uma distribuição de frequência das quantidades de RSU mensais previstas até 2026, foi possível gerar a frequência acumulada dos RSU e estimar o acúmulo dos mesmos no ASCG até o ano de 2026.

7.2.3.3 Caracterização dos resíduos sólidos presentes no aterro sanitário de campina grande

Um aspecto importante para análise no que diz respeito aos RSU e sua conversão a partir das tecnologias de conversão térmica é sua constituição. A partir dos resíduos que compõem os RSU de certa localidade é possível analisar sua capacidade no que concerne à sua conversão energética.

Considerando que, na presente pesquisa, os resíduos poliméricos presentes nos RSU são o foco principal, analisar a constituição dos RSU da localidade selecionada, assim como, a quantidade de resíduos poliméricos existentes no mesmo é de suma importância.

Isto posto, com base na pesquisa desenvolvida por Costa (2019) foi possível conhecer e analisar a composição gravimétrica dos RSU dispostos no ASCG, conhecendo dessa forma sua constituição e porcentagem de resíduos poliméricos e recicláveis.

A composição volumétrica é também um fator importante e que deve ser analisado em virtude de relacionar-se com o espaço ocupado pelos RSU e consequente ocupação do aterro. Com base no estudo desenvolvido por Araújo Neto (2018) foi possível conhecer e analisar a composição volumétrica dos RSU dos ASCG.

7.2.3.4 Estimativa dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG

Considerando o objetivo da presente pesquisa, assim como do estudo de caso realizado, quantificar os polímeros dispostos no ASCG é de suma importância. Consequente, uma estimativa do quantitativo de resíduos poliméricos dispostos no ASCG foi realizada, a mesma considerou um período de 6 anos que compreendeu agosto de 2015, ano de início das atividades no aterro, até agosto de 2021.

Os resíduos poliméricos dispostos no ASCG durante o período supracitado foram estimados a partir dos dados de disposição de RSU no aterro no intervalo de tempo mencionado e na composição gravimétrica dos mesmos.

7.2.3.5 Estimativa do acúmulo de resíduos poliméricos dispostos no ASCG

Uma estimativa da quantidade de resíduo polimérico acumulado ao longo dos anos no ASCG foi realizada, visto que, os mesmos são o foco do estudo de caso. A estimativa considerou os anos de 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 e 2021 e foi realizada a partir da estimativa da quantidade de polímeros dispostos no ASCG durante os anos supramencionados e de sua frequência acumulada.

7.2.3.6 Projeção dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG

Assim como foi realizada uma estimativa referente aos RSU dispostos no ASCG nos anos subsequentes e atentando para os resíduos de maior interesse, os plásticos, estimou-se também a quantidade de resíduos de polímeros que o ASCG receberá até o ano de 2026, tal previsão teve como base a projeção feita para estimar a quantidade de RSU dispostos no ASCG até o ano de 2026 e a análise gravimétrica dos mesmos.

A partir das estimativas dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG de 2015 a 2021 e das quantidades mensais previstas até 2026, foi possível mensurar o acúmulo dos mesmos no ASCG até o ano de 2026.

7.2.4 Tecnologias de conversão térmica aplicadas aos resíduos poliméricos

Considerando a definição de destinação adequada presente no artigo terceiro da política nacional de resíduos sólidos, a qual determina se deve incluir o reaproveitamento dos RSU e aspirando uma gestão eficiente, ações como a conversão dos resíduos presentes no ASCG a partir das tecnologias de conversão térmica permitem a mudança no cenário atual do aterro e ainda uma minimização do acúmulo de RSU, uma das diretrizes presente na Política Nacional de Resíduos Sólidos, além de contribuir com a otimização da vida útil do aterro.

Araújo Neto (2018) cita que a lei federal n.12.305 determina que uma das ações prioritárias na gestão dos resíduos é a reciclagem, a qual pode ser definida como um processo de transformação dos resíduos, envolvendo modificação em suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas com a finalidade de obtenção de novos produtos. Entende-se, portanto, de acordo com a definição supradita, que as tecnologias de conversão térmica são formas de reciclagem dos RSU.

A gestão eficiente não diz respeito apenas as tecnologias para conversão e reutilização do RSU, mas sim a todas as etapas que compreendem o gerenciamento de RSU as quais devem ser observadas e evoluídas caso necessário, desde a coleta dos resíduos até sua destinação final.

Isto posto, a implantação de uma usina *waste to energy* para a conversão dos resíduos poliméricos presentes no ASCG associada a um sistema de reciclagem dos demais materiais recicláveis presentes nos resíduos no aterro irá contribuir com a minimização dos RSU acumulados no aterro, aumento da vida útil do aterro, reutilização, conversão e reciclagem do RSU anteriormente descartados o que ocasionará em um ganho econômico.

Nessa perspectiva, avaliou-se cenários quanto a existência e implementação de uma usina *waste to energy* para tratamento e reaproveitamento dos resíduos poliméricos existentes.

Os cenários analisados consideraram a existência de uma planta de gaseificação e de pirólise para conversão de resíduos poliméricos, desde o início das atividades no ASCG, estimando dessa forma os possíveis produtos obtidos. Cenários futuristas também foram analisados e conjecturas no que se refere aos possíveis produtos obtidos a partir da pirólise e/ou gaseificação dos resíduos poliméricos do ACSG também foram feitas.

Com base nos resultados alcançados no processo de pirólise, gaseificação e da planta de geração de energia modelados, além do levantamento de dados e estimativas referentes aos RSU e poliméricos dispostos no ASCG inferiu-se a respeito do potencial energético perdido com os resíduos dispostos no ASCG de 2015 a 2021, além de estimativas futuras, caso o sistema de pirolise ou gaseificação fosse implementado para tratamento dos RSU do ASCG.

7.2.4.1 Estimativa do potencial de geração de gás de síntese – Resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021

Considerando os estudos anteriormente realizados e principalmente os resultados alcançados no processo de gaseificação simulado no capítulo 5, que permitiram constatar o alto poder de conversão de polímeros em gás de síntese, foi

realizada uma análise no que se refere a essa tecnologia aplicada aos resíduos poliméricos do ASCG.

O estudo de caso considerou inicialmente os resíduos poliméricos dispostos no ASCG desde o início de suas atividades até agosto de 2021, os quais, devido à ausência de um tratamento foram acumulados na localidade. Em vista disso estimou-se a quantidade de gás de síntese que seria possível obter em um cenário hipotético, no qual, os resíduos poliméricos do ASCG fossem submetidos ao processo de gaseificação.

Embasado nos resultados atingidos no processo de gaseificação simulado e na estimativa da quantidade de resíduos de polímeros dispostos no ASCG foi realizada uma estimativa da quantidade de gás de síntese que poderia ter sido produzida com os polímeros dispostos no ASCG durante seguinte período: agosto de 2015 a Agosto de 2021.

Na tabela 19 encontram-se os resultados da simulação do processo de gaseificação de polímeros que foram base para realizar a inferência supramencionada.

Tabela 19. Tabela de conversão de polímero em gás de síntese

Quantidade de polímero	Gás de síntese produzido
6 kg/hr	10,2536 kg/hr

Fonte: autora (2022)

Os dados da tabela 19 permitem quantificar a conversão dos polímeros em gás de síntese, observa-se que a partir de uma vazão de 6 kg/hr é possível a obtenção de 10,2536 kg/hr de gás de síntese.

Os valores da tabela 19 foram convertidos em toneladas ao mês o que permitiu estimar a quantidade de gás correspondentes as quantidades de resíduos sólidos dispostos no aterro em cada mês de agosto de 2015 a agosto de 2021.

7.2.4.2 Estimativa do potencial de geração de gases combustíveis – Resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021

Fundamento no fato de que o gás de síntese apresenta uma constituição rica em gases combustíveis, o quais podem ser utilizados separadamente, foi realizada uma inferência no que concerne aos gases combustíveis que poderiam ser produzidos e suas quantidades, caso os resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021 no ASCG fossem convertidos a partir do processo de gaseificação.

A estimativa do potencial de gases combustíveis associado aos resíduos de polímeros dispostos no ASCG no período de 6 anos (2015-2021) foi realizada com base nos resultados da simulação do processo de gaseificação dos polímeros no que se refere a constituição do gás de síntese obtido (tabela 20).

Tabela 20. Fração mássica dos compostos presentes no gás de síntese

Composto	Fração mássica
O ₂	1,397E-23
H ₂ O	0,266
CH ₄	0,167
N ₂	0,0005
H ₂	0,0514
CO ₂	0,2657
CO	0,1488
H ₂ S	0,00027
S	4,256E-16

Fonte: autora (2022)

Como é possível observar na tabela 20, o gás de síntese apresenta em sua composição o metano, hidrogênio e monóxido de carbono os quais podem ser separados e largamente utilizados como combustíveis.

Embasado na estimativa das quantidades mensais de gás de síntese hipoteticamente gerado e na fração em massa do hidrogênio, metano e monóxido de carbono presentes no mesmo conjecturou-se as quantidades de H₂, CH₄ e CO que teoricamente seriam produzidos a partir dos plásticos dispostos no ASCG nos anos de 2015 a 2021.

7.2.4.3 Estimativa do potencial energético – Resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021

Uma das diversas rotas que o gás de síntese possibilita é a geração de energia, no capítulo 6, tal possibilidade foi analisada e com base os resultados alcançados no referido capítulo foi realizada uma estimativa do trabalho líquido, em KW, que poderia ser gerado com os polímeros encaminhados para o ASCG de agosto de 2015 a agosto de 2021.

Além dos resultados da simulação do processo de gaseificação integrado a uma planta de geração de energia, a estimativa do potencial energético dos resíduos poliméricos fundamentou-se nas quantidades, estimadas anteriormente, de resíduos poliméricos dispostos no ASCG de 2015 a 2021.

7.2.4.4 Projeção da geração de gás de síntese

Posterior a análise do potencial energético perdido nos anos que se sucederam análises e inferências no que concerne aos anos seguintes foram realizadas. Nessa perspectiva estimou-se a quantidade de gás que pode ser produzida caso um sistema de gaseificação seja implantado no ASCG.

A partir da projeção de resíduos poliméricos dispostos no ASCG até o ano de 2026 e fundamentado nos resultados obtidos no processo de gaseificação de polímeros simulado na presente pesquisa os quais fornecem informações referentes a conversão de polímeros em gás de síntese foi possível prognosticar as possíveis quantidades de gás e síntese que podem, a partir dos polímeros dispostos no ASCG, ser geradas.

7.2.4.5 Projeção da geração de gases combustíveis

Da mesma forma que se estimou a quantidade de gases combustíveis obtida a partir do gás de síntese gerado no período de agosto de 2015 a agosto de 2021, inferiu-se a respeito das quantidades de gases combustíveis que podem ser obtidas com os resíduos poliméricos do ASCG nos anos que descenderão.

A projeção da geração de gases combustíveis foi desenvolvida a partir da projeção do gás de síntese produzido com os polímeros dispostos no ASCG até o ano de 2026 e com base na composição do gás de síntese, a qual foi obtida no processo de simulação da gaseificação dos polímeros.

Inferiu-se a respeito das quantidades de hidrogênio, metano e monóxido de carbono que podem ser obtidos nos anos seguintes caso ocorra a implementação de uma planta de gaseificação no ASCG.

7.2.4.6 Projeção da geração de energia

Em posse dos dados referentes as quantidades estimadas de plásticos dispostos no ASCG até o ano de 2026 e diante dos resultados obtidos na simulação da planta de geração de potência, inferiu-se a respeito da quantidade de trabalho líquido, em KW, que pode ser obtido nos anos subsecutivos a partir do tratamento térmico e conversão dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG.

7.2.4.7 Pirólise dos resíduos poliméricos do ASCG - Resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021

Na simulação da pirólise de materiais poliméricos, realizada no capítulo 4, foi possível constatar a capacidade do referido processo na conversão polímeros em materiais de alto valor agregado, principalmente no que se refere ao óleo de pirólise, o qual, de acordo com os resultados alcançados no processo modelado, apresenta características semelhantes à dos combustíveis convencionais.

Nessa perspectiva, o estudo de caso é também composto pela análise e inferências a respeito do processo de pirólise dos RSU dispostos no ASCG.

Com base nos resultados alcançados no capítulo 4 e na estimativa da quantidade de polímeros dispostos no ASCG de agosto de 2015 a agosto de 2021 foi feita uma estimativa dos possíveis produtos alcançados caso os resíduos poliméricos dispostos no aterro no referido período fossem submetidos ao processo de pirólise.

Os resultados obtidos no processo de pirólise modelado revelam que com um fluxo de 100 kg/h de polímero é possível obter 49,4 kg/h de carvão (fração sólida), 12,88 kg/hr de gás e 37,72 kg/h da fração líquida (óleo de pirólise). Com base nessas

informações foi possível estimar as quantidades de carvão, gás e óleo de pirólise que poderiam ser obtidas com os resíduos plásticos dispostos no ASCG no período de 2015-2021.

7.2.4.8 Projeção dos produtos obtidos no processo de pirólise

Considerando a possibilidade da implementação de uma planta de pirólise no ASCG com a finalidade de conversão e tratamento dos resíduos de polímeros, estimou-se as quantidades de carvão, gás e óleo de pirólise que podem ser obtidas nos anos seguintes. A referida estimativa teve como base os resultados referentes a projeção de resíduos de polímeros dispostos no ASCG até o ano de 2026 e os resultados alcançados no processo de pirólise modelado referentes a conversão de polímeros em carvão, gás e óleo de pirólise.

7.3 MATERIAIS RECICLÁVEIS

O principal foco do presente estudo de caso são os resíduos poliméricos, entretanto, outros materiais recicláveis fazem parte da constituição dos RSU presentes no ASCG, os quais podem ser comercializados para as indústrias de reciclagem ou sucateiros. Consequente, é interessante analisar as quantidades de materiais recicláveis dispostos no aterro, as quais representam uma perda do potencial econômico associado aos mesmos, em virtude de sua simples disposição e acúmulo.

Isto posto, realizou-se uma estimativa das quantidades de materiais recicláveis (vidro, metal, papel e papelão) dispostos no ASCG de Agosto de 2015 a Agosto de 2021, a partir do levantamento de dados realizado referente a quantidade de RSU disposto no aterro e de sua análise gravimétrica.

7.3.1 Projeção dos materiais recicláveis

Projetou-se as quantidades de materiais recicláveis (vidro, metal, papelão e papel) que serão dispostos no ASCG, caso o padrão de disposição de 2015 a 2021 seja mantido. Tal projeção foi feita fundamentando-se na projeção dos RSU até o ano de 2026 e na análise gravimétrica dos RSU do ASCG.

7.3.2 Potência econômico associado aos materiais recicláveis

Como já mencionados, os materiais recicláveis presentes nos RSU, caso passassem por um processo de triagem, poderiam ser comercializados, nesse contexto, realizou-se uma análise acerca do potencial econômico associado a comercialização dos materiais recicláveis (vidro, metal, papel e papelão) dispostos no ASCG.

7.3.2.1 Estimativa do potencial econômico perdido – Materiais recicláveis dispostos no ASCG de 2015 a 2021

A coleta seletiva e triagem dos resíduos encaminhados ao ASCG é inexistente, dessa forma, os materiais chegam ao aterro misturados com os demais resíduos impedindo dessa forma sua comercialização e reaproveitamento.

O cenário acima citado, foi o cenário dos resíduos dispostos no ASCG entre 2015 e 2021, nesse sentido, observa-se um desperdício no que se refere aos materiais recicláveis, que reflete na perda econômica associada a seu reaproveitamento e comercialização.

Diante desse panorama, avaliou-se o potencial econômico perdido pela simples disposição dos materiais recicláveis presentes nos RSU dispostos no ASCG de Agosto de 2015 a Agosto de 2021, os quais poderiam ter sido comercializados.

A estimativa da quantidade, em reais, que poderia ter sido arrecadada com a comercialização os matérias recicláveis presentes no ASCG foi realizada com base nas estimativas das quantidades de vidro, metal, papel e papelão dispostos no ASCG e nos preços de venda associados a cada material em seus respectivos anos, os quais são apresentados na tabela 22.

Tabela 21. Histórico de preços dos materiais recicláveis
Preço R\$/kg

Ano	2017	2018	2019	2020
Vidro	0,21	0,11	0,1	0,24
Metal	1,68	2,085	2,08	3,27

Papel	0,33	0,36	0,34	0,34
Papelão	0,33	0,36	0,34	0,34

Fonte: Anuário da reciclagem 2017-2018; Anuário da reciclagem 2020; Anuário da reciclagem 2021

Os valores presentes na tabela 22 foram extraídos dos anuários de reciclagem de 2017/2018, 2020 e 2021. As estimativas dos valores arrecadados nos anos de 2015 e 2016 basearam-se nos preços de venda do ano de 2017. No tocante ao preço de venda dos metais, este foi estimado como uma média dos valores de venda do alumínio e nos valores de venda dos demais metais. Além disto, diante do fato de que, o papelão é uma categoria de papel, seu o valor de venda foi considerado igual ao valor de venda do papel.

2.2.7.1 Projeção do potencial econômico dos materiais recicláveis dispostos no ASCG até o ano de 2026

Uma projeção da quantidade que pode ser arrecadada a partir da implantação de um processo de triagem e comercialização dos materiais recicláveis (metal, vidro, papel e papelão) nos anos seguintes foi realizada.

A estimativa foi feita com base nos dados obtidos na projeção de materiais recicláveis dispostos no ASCG até o ano de 2026 e nos preços de venda presentes na tabela 22, considerando os preços de venda do ano mais recente, ou seja, o ano de 2021.

Assim como a metodologia executada na estimativa do potencial econômico perdido, para a presente estimativa, o valor do metal foi uma média dos valores do alumínio e outros metais e o valor do papelão teve como base o valor do papel, já que o mesmo se enquadra nessa classificação.

7.3 RESULTADOS

7.3.1 Escolha da localidade

O Aterro Sanitário de Campina Grande foi a localidade escolhida para o desenvolvimento do estudo de caso. Localizado na cidade de Campina Grande - que

representa a maior parcela de RSU dispostos no aterro – o município não apresenta, de acordo com a ECOSAM (2014), um sistema de coleta seletiva, dessa forma, os resíduos recicláveis são encaminhados para destinação final juntamente com os demais resíduos, o mesmo acontece com os demais resíduos recebidos no aterro e provenientes de outros municípios e empresas.

Diante do exposto, o cenário acima descrito reflete a situação dos centros urbanos brasileiros, os quais, em sua maioria, não realizam coleta seletiva e não dispõem de tecnologias de tratamento dos RSU.

Além disto, a partir de uma pesquisa literária verificou-se a existência e disponibilidade de dados suficientes acerca de fatores importantes do ASCG que se enquadram como base para a realização do estudo de caso e permitem a realização de estimativas consideradas no estudo.

Vale salientar que os dados disponíveis apresentam um histórico dos RSU dispostos no aterro desde o início de suas atividades até dados atuais e que são relativamente recentes e possibilitam melhor observação do cenário analisado.

Outro fator importante é a grande quantidade de RSU recebida anualmente pelo aterro e de acordo com sua composição gravimétrica a grande quantidade de resíduo polimérico existente nos mesmos e passível de conversão a partir do processo de gaseificação e pirólise.

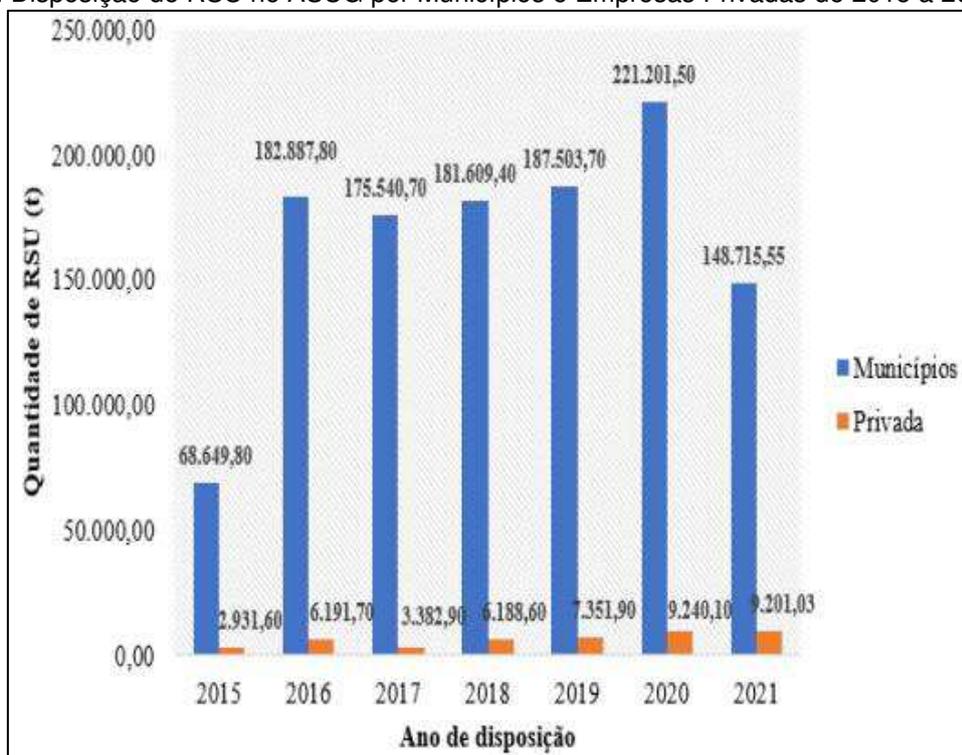
7.3.2 Coleta de dados

Inicialmente, apenas quatro municípios e algumas empresas privadas realizavam a disposição de seus resíduos no ASCG, com o passar dos anos, outros Municípios e empresas passaram a destinar seus resíduos para o aterro o que contribuiu significativamente com o aumento dos mesmos. Atualmente, além dos RSU no município de Campina Grande o ASCG recebe resíduos de mais 59 municípios. Além dos municípios do estado da Paraíba, o ASCG recebe também resíduos provenientes do estado de Pernambuco, correspondentes aos municípios de Casinhas e Orobó (CEZÁRIO, 2022).

Entre os Municípios atendidos pelo ASCG, a maior contribuição no que se refere aos RSU dispostos no ASCG é proveniente do Município de Campina Grande, seguido do Município de Queimadas e Lagoa seca, os quais representam, 87,62%, 2,45% e 1,89% dos RSU dispostos respectivamente (CEZÁRIO, 2022). Vale destacar

que apesar do ASCG também receber resíduos de empresas privadas, a quantidade de resíduos provenientes de municípios é bem mais significativa, como é possível observar na figura 45.

Figura 45. Disposição de RSU no ASCG por Municípios e Empresas Privadas de 2015 a 2021



Fonte: CEZÁRIO (2022)

A partir do gráfico presente na figura 45 é possível constatar que a parcela de RSU proveniente dos Municípios é significativamente maior comparada aos resíduos oriundos de empresas privadas.

O ASCG foi projetado, de acordo com Cezário (2022), para receber 350t/dia de RSU, entretanto, com o passar dos anos, a quantidade de resíduos recebidas aumentou e em 2021 o aterro recebia uma quantidade média de 649,86 t/dia, na tabela 23 é possível observar as médias anuais de resíduos sólidos urbanos dispostos no ASCG nos anos de 2015 a 2021.

Tabela 22. Média anual de RSU dispostos no ASCG

Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Média (t/d)	417,41	516,61	490,20	514,51	533,85	605,03	649,86

Fonte: Cezário (2022)

Observa-se um aumento na média anual dos resíduos dispostos, consequência do aumento dos municípios atendidos pelo aterro, que de acordo com Cezário (2022), aumentou 1400%.

O aumento expressivo dos Municípios atendidos pelo ASCG ocasionou um aumento nos RSU dispostos e influenciou diretamente na vida útil do aterro, estimada para 25 anos. Segundo Gurjão, Neto e Paiva (2020), o aterro sanitário de Campina Grande está abaixo da expectativa de vida útil projetada, visto que, a mesma foi reduzida de 25 para 11 anos.

A tabela 24 apresenta dados referentes as quantidades mensais de RSU dispostos no ASCG desde de Agosto de 2015, ano do início das atividades do aterro, até Agosto de 2021.

Tabela 23. Quantidades mensais de RSU dispostos no ASCG

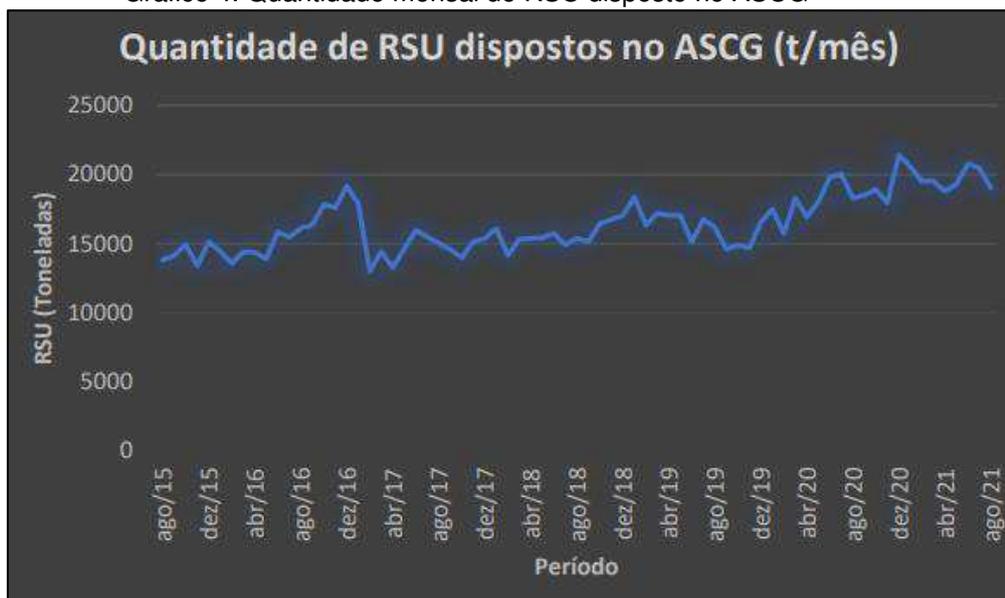
Meses	Anos						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Jan		14422,19	17930,58	16097,39	18358,33	17505,03	20532,52
Fev		13579,14	13020,24	14158,52	16342,45	15727,68	19493,80
Mar		14401,50	14441,69	15335,03	17199,41	18275,36	19549,44
Abr		14396,86	13294,15	15367,84	17077,07	16952,53	18778,24
Mai		13898,82	14606,82	15425,55	17033,38	18037,54	19320,13
Jun		15860,99	15985,67	15738,94	15119,31	19824,95	20754,01
Jul		15476,75	15506,44	14901,50	16739,06	20011,44	20462,91
Ago	13800,35	16112,92	14034,27	15382,84	16197,37	18287,77	19025,53
Set	14171,93	16335,45	14591,60	15150,92	14618,73	18502,65	
Out	14929,87	17840,53	13990,35	16448,86	14910,57	18935,86	
Nov	12403,61	17590,77	15148,72	16751,28	14680,92	17969,73	
Dez	15140,51	19163,55	15373,03	17039,31	16579,02	21411,10	

CEZÁRIO (2022)

A partir dos dados presentes na tabela 24 pode-se afirmar que o ASCG recebeu em média de 16458,48 toneladas mensais de RSU. Observa-se que, em alguns meses a quantidade de resíduos sólidos é superior, entretanto, os dados apresentam pouca variabilidade, o que é confirmado a partir do coeficiente de variabilidade (CV) que de 12,51%, dessa forma, os dados são homogêneos.

O gráfico 4, desenvolvido com base nos dados coletados na pesquisa desenvolvida por Cezário (2022) permite uma melhor observação no que se refere a variação mensal da quantidade de RSU dispostos no ASCG entre o período de 2015 a 2021.

Gráfico 4. Quantidade mensal de RSU disposto no ASCG



Fonte: Autora (2022)

Observa-se um aumento acentuado nos RSU dispostos no ASCG nos anos de 2020 e principalmente no ano de 2021. De acordo com a tabela 25 2021 foi o ano com maior média diária de RSU recebido no aterro (649, 86 t/dia), vale salientar que os anos de 2020 e 2021 foram anos atípicos, nos quais, a pandemia da COVID-19 levou o mundo a uma crise sanitária. Dessa forma, a crise pode ter influenciado para o aumento da geração de RSU, além disto, pode-se ainda atribuir esse aumento em consequência das iniciativas do MPPB para serem regularizadas a forma de disposição dos municípios em cumprimento da PNRS.

Outro fator importante e relacionado ao aumento da quantidade de RSU dispostos no ASCG nos anos e 2020 e 2021 foi o expressivo aumento dos municípios atendidos pelo aterro, de acordo com Cezário (2022) ocorreu um aumento de 45 municípios só no ano de 2020.

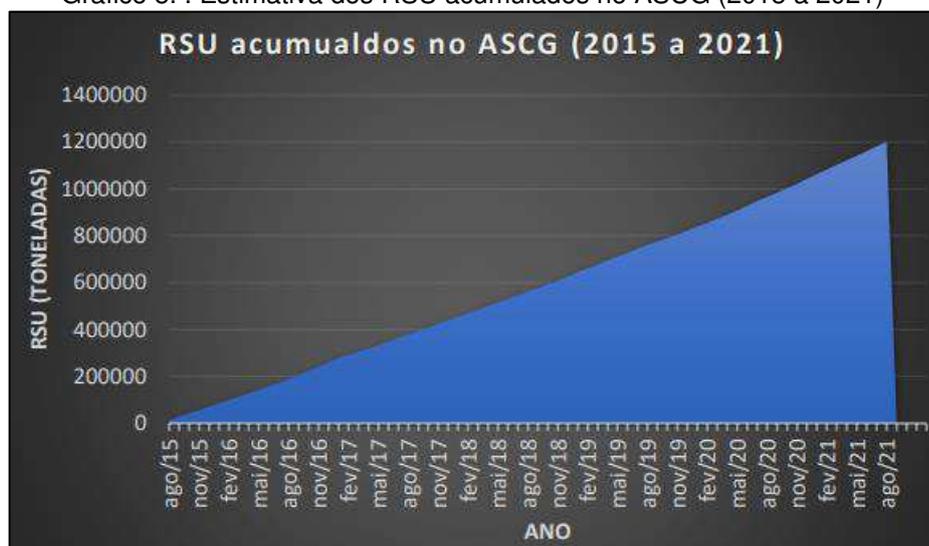
O histórico de disposição dos resíduos recebidos com o passar dos anos pelo ASCG permite verificar o grande potencial energético e econômico perdido com a simples disposição dos resíduos recicláveis, pode-se ainda observar que tal desperdício aumenta ao longo dos anos, visto que, a quantidade de RSU disposto aumentou, aumentando também o acúmulo dos mesmos no aterro.

7.3.3 Análise dos RSU dispostos no ASCG

7.2.3.1 Estimativa do acúmulo de RSU no ASCG

O gráfico 5 apresenta observar a frequência acumulada dos RSU encaminhados mensalmente para o ASCG, a partir dele é possível observar o acúmulo de RSU no ASCG em função do tempo.

Gráfico 5. . Estimativa dos RSU acumulados no ASCG (2015 a 2021)



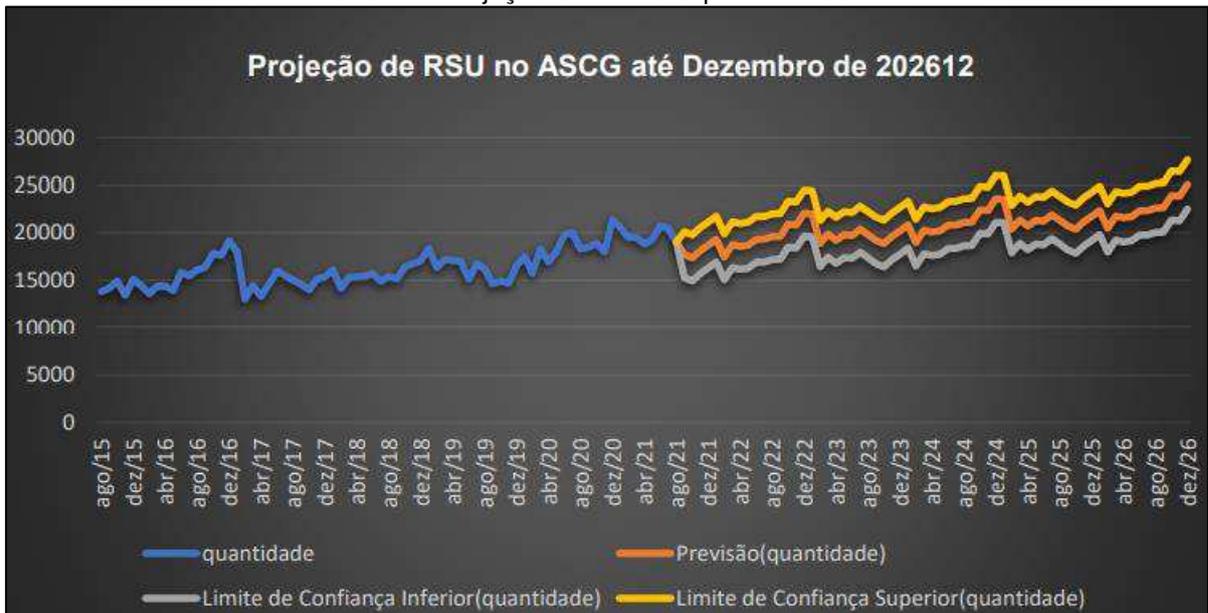
Fonte: autora (2022)

De acordo com o gráfico 5, estima-se que até agosto de 2021 aproximadamente 1.201.469 toneladas de RSU encontravam-se acumulados no ASCG.

7.3.3.2 Projeção e acúmulo da quantidade de RSU dispostos no ASCG até 2026

O gráfico 6 apresenta a estimativa das quantidades mensais de RSU dispostos no ASCG nos próximos anos caso mantenha-se o padrão de disposição atual, é possível ainda observar os limites de confiança superior e inferior que permitem a visualização da variação dos valores previstos.

Gráfico 6. Projeção dos RSU dispostos no ASCG



Fonte: Autora (2022)

Observa-se, a partir da estimativa presente no gráfico 6 a tendência ao aumento da quantidade de RSU disposta no ASCG. Estima-se que, caso o padrão de disposição observado de 2015 a 2021 seja mantido, até 01 de dezembro de 2026 2.524.143 toneladas de RSU serão dispostos e acumulados no aterro, como é possível observar no gráfico 7 que apresenta uma projeção do acúmulo de RSU com os anos.

Gráfico 7. Projeção do acúmulo dos RSU no ASCG até o ano de 2026



Fonte: Autora (2022)

A predisposição ao aumento de RSU nos próximos anos é um fator preocupante considerando que, segundo Gurjão, Neto e Paiva (2020), a vida útil do aterro já foi reduzida em decorrências do aumento e acúmulo dos RSU dispostos no mesmo, dessa forma, futuramente, o aterro terá que passar por adaptações a fim de aumentar sua vida útil e atender as quantidades de RSU destinadas ao mesmo.

O acúmulo dos RSU no ASCG não é adequado, visto que, representa um desperdício de seu potencial reciclável e energético. No Brasil, no que se refere aos aterros, a lei nº 12.305, de 2010 que Instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos criando instrumentos e diretrizes para alcançar os objetivos prevê ações que minimizem a quantidade de resíduos destinados aos aterros, dentre essas ações pode-se citar a reciclagem, programas de coleta seletiva, projetos de geração de energia, entre outras.

7.3.3.3 Caracterização dos resíduos sólidos presentes no aterro sanitário de Campina Grande

Na Tabela 25 é possível observar a composição dos RSU presentes no ASCG no período que compreende os anos de 2008 a 2015.

Tabela 24. Composição gravimétrica dos RSU em anos distintos

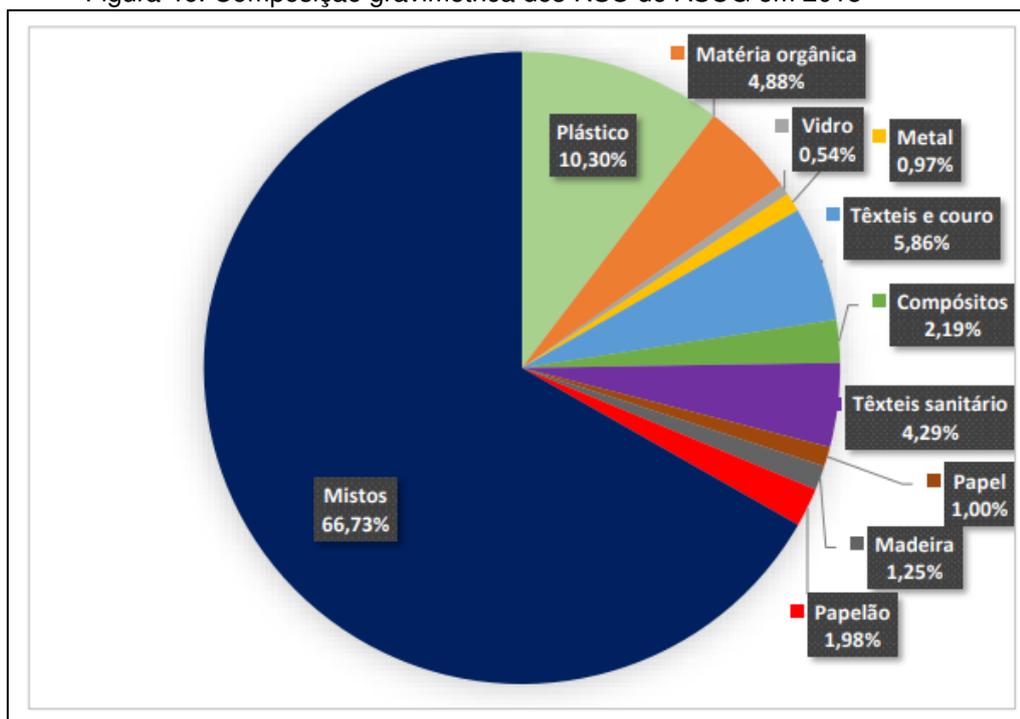
Componente	Ano da caracterização gravimétrica dos RSU				
	2008	2009	2011	2013	2015
Plástico	11,44%	11%	22,5%	22,25%	16,7%
Matéria Orgânica	69,53%	66%	46,9%	42%	46,5%
Papel e Papelão	6,23%	5%	9,3%	11,89%	11,1%
Material misto	3,16%	6%	8,2%	7,28	12,4
Têxteis sanitários	6,71%	4%	6,3%	8,69%	7,9%
Compósitos	0,95%	1%	3,3%	-	2,4%
Metal	0,71%	3%	1,7%	2,88%	0,6%
Vidro	1,18%	4%	2,0%	2,24%	2,5%
Total	99,91%	100%	100%	100%	100%

Fonte: ARAÚJO NETO (2018)

Observando a Tabela 25 e a composição gravimétrica dos RSU existentes no ASCG no decorrer dos anos constata-se que os RSU são compostos em sua maioria por resíduos orgânicos, seguido dos plásticos, o qual tem grande potencial no que se refere ao tratamento químico e recuperação energética.

No gráfico presente na Figura 46 é possível observar a composição gravimétrica dos RSU presentes no ASCG no ano de 2019. A partir do mesmo é possível constatar uma predominância de material misto de difícil identificação, segundo Araújo Neto (2018) este fato pode ser consequência de os resíduos caracterizados estarem aterrados em uma camada intermediária de solo.

Figura 46. Composição gravimétrica dos RSU do ASCG em 2018

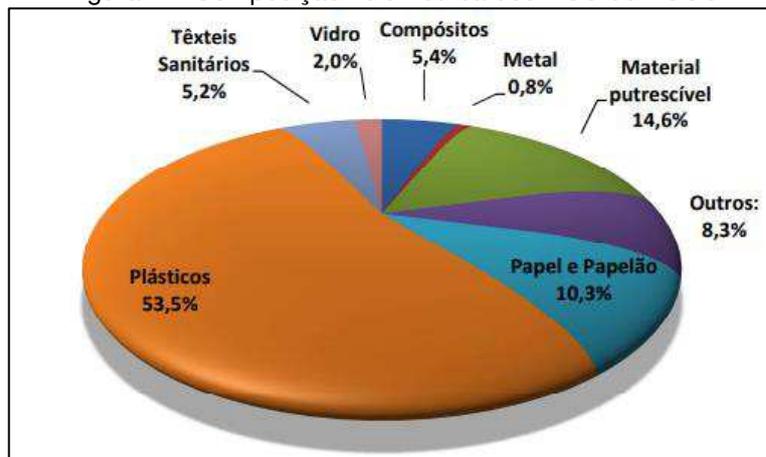


Fonte: Costa (2019)

Os RSU apresentam em sua composição 24,09% de materiais recicláveis (plástico, papel, papelão, vidro, metal, compósitos, madeira, têxteis e couro), pode-se ainda verificar a predominância dos materiais poliméricos (plásticos) tanto na Tabela 25 quanto na Figura 46.

Além da composição gravimétrica, é de extrema importância, principalmente no que se refere a ocupação e vida útil do aterro, a análise de composição volumétrica dos RSU dispostos no ASCG. Na Figura 47 é possível observar a composição volumétrica os RSU presentes no ASCG.

Figura 47. Composição volumétrica dos RSU do ASCG



Fonte: ARAÚJO NETO (2018)

É importante a análise da composição volumétrica uma vez que alguns materiais, a exemplo dos plásticos, mesmo com baixa densidade podem vir a ocupar um espaço relativamente significativo, dessa forma, sua análise pode ajudar no que se refere ao espaço ocupado pelos RSU e seu gerenciamento.

Além disto, vários fatores podem influenciar no tempo de vida útil de um aterro sanitário, dentre eles está o peso específico e a composição dos constituintes do RSU presente no aterro. Dentre os constituintes, um que se destaca é o plástico, visto que, segundo Gurjão, Neto e Paiva (2020), esse material apresenta elevado volume no que se refere aos RSU e mesmo compactados preenchem mais espaços maciços no aterro sanitário, além disto, sua biodegradação é lenta, dessa forma comprometem a vida útil dos aterros.

7.3.3.4 Estimativa dos resíduos poliméricos presentes no ASCG

De acordo com a análise gravimétrica dos RSU presentes no ASCG 24,09% dos resíduos são constituídos por materiais recicláveis. Essa porcentagem é composta majoritariamente pelos resíduos poliméricos, visto que, eles representam uma parcela de 10,3% dos materiais recicláveis que compõem os RSU do ASCG.

Na tabela 26 é possível observar a estimativa da quantidade de resíduo polimérico, em toneladas, disposta mensalmente no aterro desde o início de suas atividades, agosto de 2015, até agosto de 2021.

Tabela 25 Quantidades mensais de resíduos polimérico dispostos no ASCG

Meses	Anos						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Jan		1485,486	1846,85	1658,031	1890,908	1803,018	2114,85
Fev		1398,651	1341,085	1458,328	1683,272	1619,951	2007,861
Mar		1483,355	1487,494	1579,508	1771,539	1882,362	2013,592
Abr		1482,877	1369,297	1582,888	1758,938	1746,111	1934,159
Mai		1431,578	1504,502	1588,832	1754,438	1857,867	1989,973
Jun		1633,682	1646,524	1621,111	1557,289	2041,97	2137,663
Jul		1594,105	1597,163	1534,855	1724,123	2061,178	2107,68
Ago	1422,26	1659,631	1548,53	1584,433	1668,329	1883,64	1959,63
Set	1459,709	1682,551	1502,935	1560,545	1505,729	1905,773	
Out	1537,777	1837,575	1441,006	1694,233	1535,789	1950,394	
Nov	1380,572	1811,849	1560,318	1725,382	1512,135	1850,882	
Dez	1559,473	1973,846	1583,422	1755,049	1707,639	2205,343	

Fonte: Autora (2022)

De acordo com os dados presentes na tabela 28 o ASCG recebeu em média 1695,224 toneladas mensais de resíduos poliméricos. O gráfico 8 permite uma melhor observação das quantidades mensais de resíduos poliméricos e sua variação no período que compreende agosto de 2015 a agosto de 2021.

Gráfico 8. Quantidades mensais de resíduos poliméricos dispostos no ASCG



Fonte: Autora (2022)

Como é possível observar no gráfico 8 as quantidades de resíduos poliméricos dispostos no ASCG intensificaram-se nos anos de 2016 e principalmente nos anos de 2020 e 2021. No gráfico 9 é possível observar as médias anuais, em toneladas, de polímeros dispostos no ASCG.

Gráfico 9. Média anual de resíduos poliméricos dispostos no ASCG



Fonte: Autora (2022)

Com base na estimativa das quantidades de resíduos poliméricos recebidos no ASCG constata-se o grande potencial energético do aterro no que se refere ao reaproveitamento e conversão dos referidos resíduos em produtos de alto valor agregado a partir do processo de gaseificação e de pirólise.

Além disto, ao observar a composição volumétrica dos RSU presentes no aterro sanitário de Campina Grande, que possibilita visualizar e prever o espaço físico ocupado pelas frações dos resíduos e definir sua vida útil, verifica-se que o maior percentual corresponde aos plásticos. Dessa forma, a não disposição dos plásticos ou sua conversão a partir de tecnologias de conversão térmica além de economicamente, pode representar ganhos na vida útil do aterro.

7.3.3.5 Estimativa do acúmulo de resíduos poliméricos dispostos no ASCG

Das 1201469 toneladas de RSU acumuladas no ASCG até Agosto de 2021, estima-se que 123751,3 toneladas são de resíduos poliméricos, O gráfico 10 apresenta uma estimativa do acúmulo de polímeros no ASCG com o passar dos anos.

Gráfico 10 Estimativa dos RSU acumulados no ASCG (2015 a 2021)



Fonte: autora (2022)

Observa-se uma quantidade significativa de resíduos poliméricos acumulados, os quais, segundo a análise volumétrica, representam a maior parcela de ocupação do aterro comprometendo dessa forma sua vida útil. Além disso, poderiam ser utilizados, quando devidamente separados, para outras finalidades como reciclagem ou tratamento térmico.

7.3.3.7 Projeção dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG

O gráfico 11 apresenta a estimativa anual dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG em toneladas.

Gráfico 11. Estimativa dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG



Fonte: autora (2022)

Estima-se que até o ano de 2026 cerca de 259.986,7342 toneladas de polímeros serão dispostas no ASCG e caso não sejam destinados para um processo de recuperação ou reciclagem estarão acumulados no mesmo, comprometendo ainda mais a vida útil do aterro. Além disto, grande potencial energético e econômico continuará sendo perdido. O gráfico 12 apresenta a projeção dos resíduos poliméricos acumulados no aterro até o ano de 2026.

Gráfico 12 Estimativa dos resíduos poliméricos acumulados até o ano de 2026



Fonte: autora (2022)

7.3.4 Tecnologias de conversão térmica aplicadas aos resíduos poliméricos

7.3.4.1 Estimativa do potencial de geração de gás de síntese – Resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021

A tabela 27 apresenta a estimativa da produção mensal, em toneladas, de gás de síntese que poderia ser gerado com os resíduos poliméricos dispostos no período de Agosto de 2015 a Agosto de 2021, os quais encontram-se acumulados no ASCG.

Tabela 26. Geração mensal de gás de síntese em toneladas

Mês/ano	Quantidade de gás (ton)	Mês/ano	Quantidade de gás (ton)	Mês/ano	Quantidade de gás (ton)
ago/15	2430,506	set/17	2568,371	out/19	2624,515

set/15	2494,502	out/17	2462,541	nov/19	2584,093
out/15	2627,913	nov/17	2666,434	dez/19	2918,191
nov/15	2359,265	dez/17	2705,916	jan/20	3081,185
dez/15	2664,989	jan/18	2833,416	fev/20	2768,341
jan/16	2538,552	fev/18	2492,142	mar/20	3216,776
fev/16	2390,161	mar/18	2699,228	abr/20	2983,935
mar/16	2534,91	abr/18	2705,003	mai/20	3174,916
abr/16	2534,094	mai/18	2715,161	jun/20	3489,53
mai/16	2446,43	jun/18	2770,323	jul/20	3522,356
jun/16	2791,806	jul/18	2622,919	ago/20	3218,96
jul/16	2724,173	ago/18	2707,643	set/20	3256,783
ago/16	2836,15	set/18	2666,821	out/20	3333,035
set/16	2875,319	out/18	2895,281	nov/20	3162,98
out/16	3140,239	nov/18	2948,512	dez/20	3768,72
nov/16	3096,277	dez/18	2999,21	jan/21	3614,075
dez/16	3373,113	jan/19	3231,38	fev/21	3431,242
jan/17	3156,089	fev/19	2876,551	mar/21	3441,036
fev/17	2291,785	mar/19	3027,39	abr/21	3305,292
mar/17	2541,985	abr/19	3005,857	mai/21	3400,673
abr/17	2339,998	mai/19	2998,166	jun/21	3653,061
mai/17	2571,05	jun/19	2661,257	jul/21	3601,822
jun/17	2813,751	jul/19	2946,361	Ago/21	3348,819
jul/17	2729,399	ago/19	2851,014		
ago/17	2646,289	set/19	2573,147		

Fonte: Autora (2022)

De acordo com as estimativas seria possível obter a partir do processo de gaseificação dos resíduos poliméricos que foram dispostos no ASCG de Agosto de 2015 até Agosto de e 2021 em média 1.695,224 toneladas mensais de gás de síntese.

O gráfico 13 apresenta a frequência acumulada da produção mensal, em toneladas) de gás de síntese teoricamente obtido nos 6 anos analisados.

Gráfico 13. Gráfico da frequência acumulada da produção mensal de gás de síntese (2015-2021)



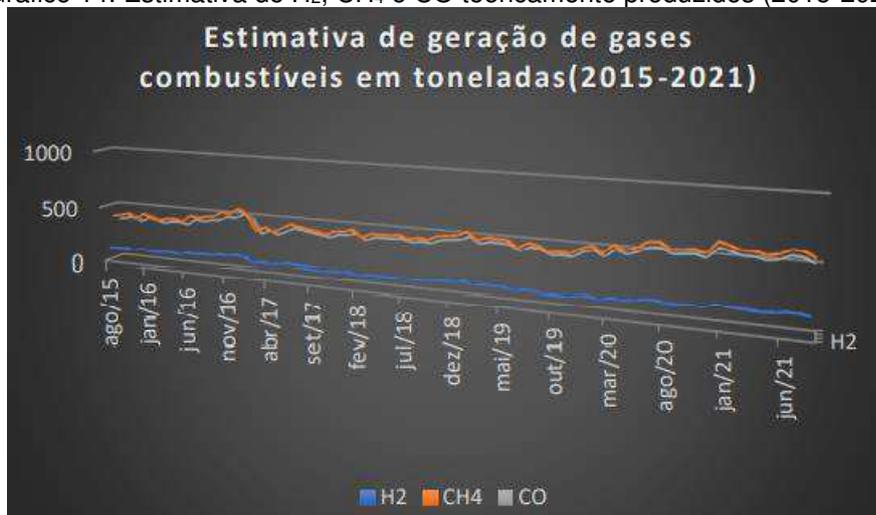
Fonte: Autora (2022)

Estima-se que um total de 211.479,1247 toneladas de gás de síntese poderiam ter sido geradas com os resíduos poliméricos dispostos no ASCG de Agosto de 2015 a Agosto de 2021.

7.3.4.2 Estimativa do potencial de geração de gases combustíveis – Resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021

O gráfico 14 apresenta a estimativa das quantidades de CO, H₂ e CH₄ teoricamente produzidas de 2015 a 2021 a partir dos polímeros dispostos no ASCG durante esse período.

Gráfico 14. Estimativa de H₂, CH₄ e CO teoricamente produzidos (2015-2021)

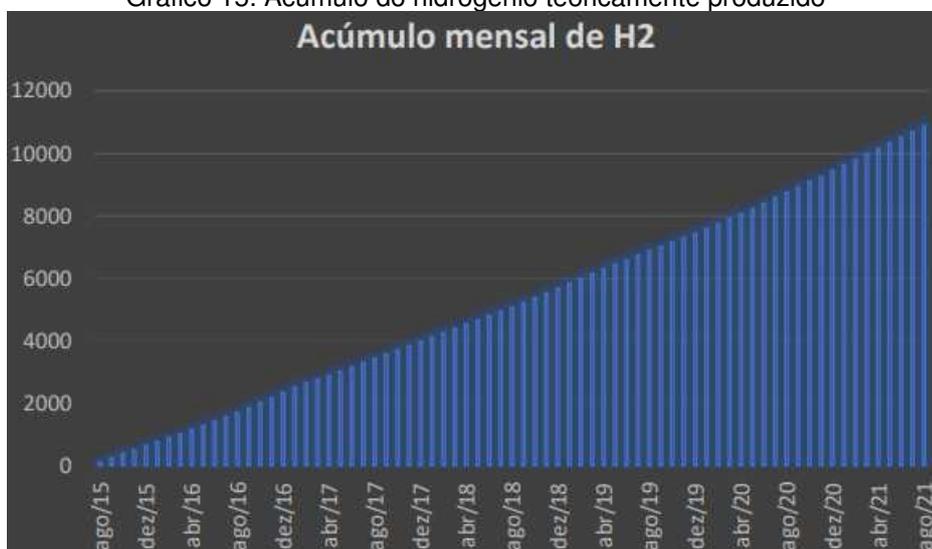


Fonte: autora (2022)

A partir do gráfico 14 constata-se, mais uma vez, o grande potencial energético perdido devido ao simples acúmulo dos plásticos no aterro, os quais poderiam ser convertidos em gases combustíveis. Estima-se que poderia ter sido produzido 149,0036, 483,5572 e 431,1451 toneladas mensais de hidrogênio, metano e monóxido de carbono respectivamente.

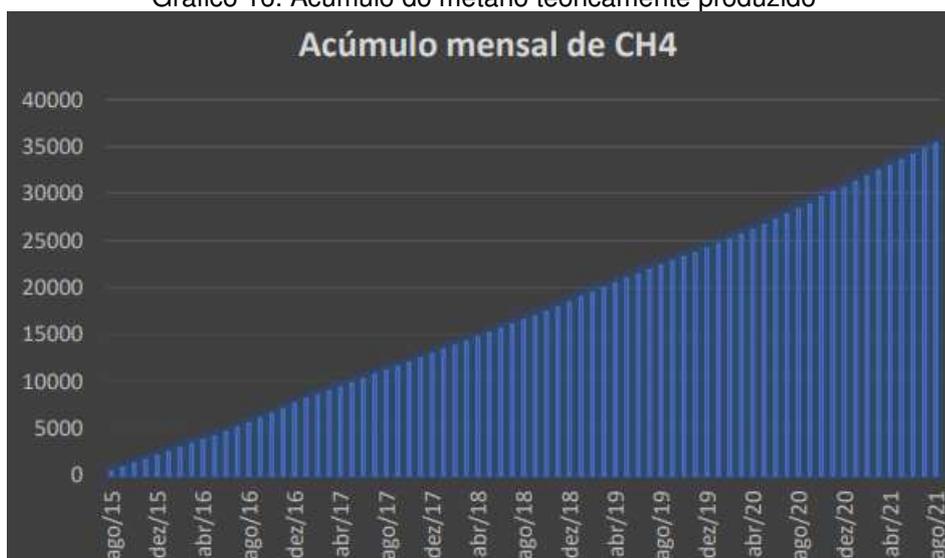
É possível ainda observar a partir dos gráficos 15,16 e 17 o acúmulo mensal dos gases combustíveis teoricamente produzidos a partir da obtenção do gás de síntese ao realizar o tratamento térmico dos polímeros dispostos no ASCG.

Gráfico 15. Acúmulo do hidrogênio teoricamente produzido



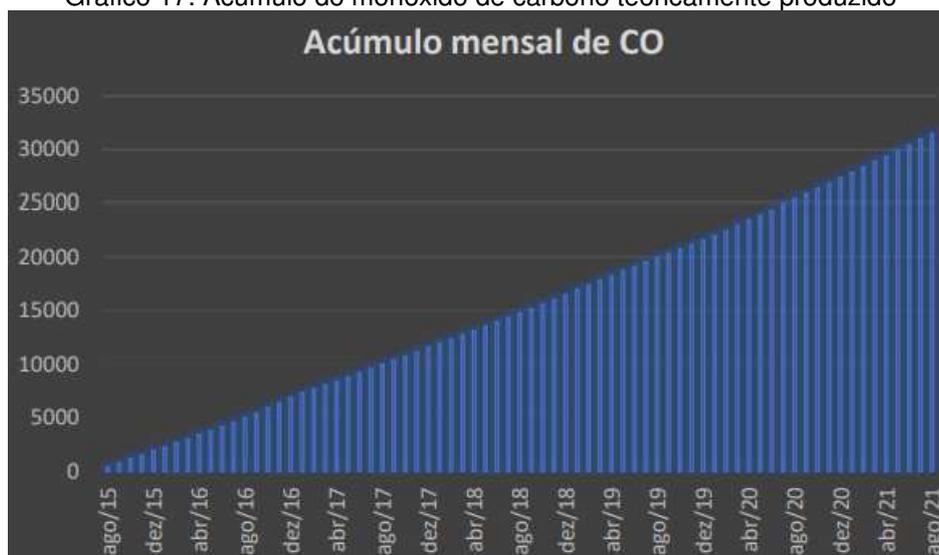
Fonte: autora (2022)

Gráfico 16. Acúmulo do metano teoricamente produzido



Fonte: autora (2022)

Gráfico 17. Acúmulo do monóxido de carbono teoricamente produzido



Fonte: autora (2022)

De acordo com os gráficos estima-se que com os resíduos poliméricos dispostos no ASCG seria possível produzir 10.877,26 toneladas de hidrogênio, 35.299,67 toneladas de CH₄ e 31.473,59 toneladas de CO.

7.3.4.3 Estimativa do potencial energético – Resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021

A tabela 28 apresenta os dados relativos à estimativa mensal, em KW, do trabalho líquido gerado a partir da submissão dos polímeros presente no ASCG ao processo de pirólise e posterior conversão do gás de síntese obtido em energia.

Tabela 27. . Estimativa mensal da quantidade de trabalho líquido teoricamente gerado

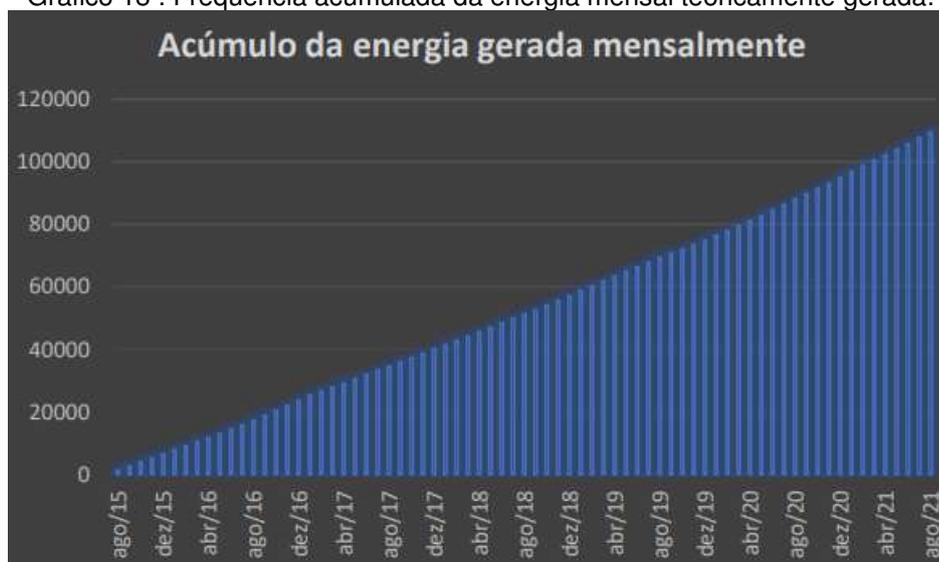
Mês/ano	Estimativa da Energia gerada	Mês/ano	Estimativa da Energia gerada	Mês/ano	Estimativa da Energia gerada
ago/15	1257,905	set/17	1329,257	out/19	1358,315
set/15	1291,026	out/17	1274,485	nov/19	1337,394
out/15	1360,073	nov/17	1380,009	dez/19	1510,306
nov/15	1221,034	dez/17	1400,443	jan/20	1594,663
dez/15	1379,261	jan/18	1466,431	fev/20	1432,751
jan/16	1313,824	fev/18	1289,805	mar/20	1664,838
fev/16	1237,025	mar/18	1396,982	abr/20	1544,332
mar/16	1311,94	abr/18	1399,971	mai/20	1643,173

abr/16	1311,517	mai/18	1405,228	jun/20	1806,002
mai/16	1266,147	jun/18	1433,777	jul/20	1822,991
jun/16	1444,895	jul/18	1357,488	ago/20	1665,969
jul/16	1409,892	ago/18	1401,337	set/20	1685,544
ago/16	1467,845	set/18	1380,21	out/20	1725,008
set/16	1488,117	out/18	1498,449	nov/20	1636,996
out/16	1625,226	nov/18	1525,998	dez/20	1950,496
nov/16	1602,474	dez/18	1552,237	jan/21	1870,46
dez/16	1745,75	jan/19	1672,397	fev/21	1775,835
jan/17	1633,43	fev/19	1488,755	mar/21	1780,904
fev/17	1186,11	mar/19	1566,822	abr/21	1710,649
mar/17	1315,601	abr/19	1555,677	mai/21	1760,014
abr/17	1211,063	mai/19	1551,697	jun/21	1890,637
mai/17	1330,644	jun/19	1377,33	jul/21	1864,118
jun/17	1456,253	jul/19	1524,885	Ago/21	1733,177
jul/17	1412,597	ago/19	1475,539		
ago/17	1369,583	set/19	1331,729		

Fonte: autora (2022)

Segundo a estimativa mensal de energia gerada a partir dos plásticos dispostos mensalmente no ASCG seria possível a geração de cerca de 1499,325 KW mensais. No gráfico 18 pode-se visualizar o acúmulo da energia que seria gerada mensalmente a partir dos resíduos poliméricos.

Gráfico 18 . Freqüência acumulada da energia mensal teoricamente gerada.



Fonte: autora (2022)

Estima-se que com os resíduos de polímeros dispostos no ASCG até Agosto de 2021 seria possível a geração de aproximadamente 109450,7 KW.

7.3.4.4 Projeção da geração de gás de síntese

A tabela 28 apresenta a estimativa da quantidade de gás de síntese, em toneladas que poderia ser gerado, de acordo com as estimativas das quantidades resíduos poliméricos dispostos no ASCG até o ano de 2026.

Tabela 28. Projeção da quantidade de gás de síntese gerado a partir do processo de gaseificação

Mês/ano	Quantidade de gás estimada (ton)						
set/21	3112,698	jan/23	3873,29	mai/24	3554,53	set/25	3644,386
out/21	3054,158	fev/23	3320,604	jun/24	3665,683	out/25	3585,847
nov/21	3188,737	mar/23	3494,813	jul/24	3665,953	nov/25	3720,425
dez/21	3292,592	abr/23	3381,194	ago/24	3713,405	dez/25	3824,28
jan/22	3401,336	mai/23	3487,832	set/24	3718,687	jan/26	3933,024
fev/22	3073,735	jun/23	3471,014	out/24	3944,555	fev/26	3605,423
mar/22	3300,014	jul/23	3588,14	nov/24	3930,533	mar/26	3831,702
abr/22	3269,327	ago/23	3484,478	dez/24	4148,559	abr/26	3801,015
mai/22	3288,685	set/23	3378,542	jan/25	4139,134	mai/26	3820,374
jun/22	3399,839	out/23	3320,003	fev/25	3586,448	jun/26	3931,527
jul/22	3400,109	nov/23	3454,581	mar/25	3760,657	jul/26	3931,797
ago/22	3447,561	dez/23	3558,436	abr/25	3647,038	ago/26	3979,249
set/22	3452,842	jan/24	3667,18	mai/25	3753,676	set/26	3984,531
out/22	3678,711	fev/24	3339,579	jun/25	3736,858	out/26	4210,399
nov/22	3664,689	mar/24	3565,858	jul/25	3853,984	nov/26	4196,377
dez/22	3882,715	abr/24	3535,171	ago/25	3750,322	dez/26	4414,403

Fonte: autora (2022)

O gráfico 19 permite uma melhor visualização em termos da produção anual de gás de síntese, caso seja implementada uma planta de gaseificação para conversão dos resíduos poliméricos dispostos no aterro sanitário de Campina Grande.

Gráfico 19. Estimativa da quantidade de gás de síntese produzido a partir do processo de gaseificação



Fonte: autora (2022)

Estima-se que de setembro de 2021 a dezembro de 2026 seria possível gerar 232813,2 toneladas de gás de síntese. O gráfico 20 apresenta a frequência acumulada da quantidade mensal de gás de síntese que pode ser produzido a partir da gaseificação dos resíduos plásticos do ASCG. Dessa forma, a partir do gráfico 20 é possível observar o acúmulo da quantidade de gás, em toneladas, que seria produzida de Setembro de 2021 até Dezembro de 2026.

Gráfico 20. Frequência acumulada da quantidade de gás de síntese que pode ser produzido



Fonte: autora (2022)

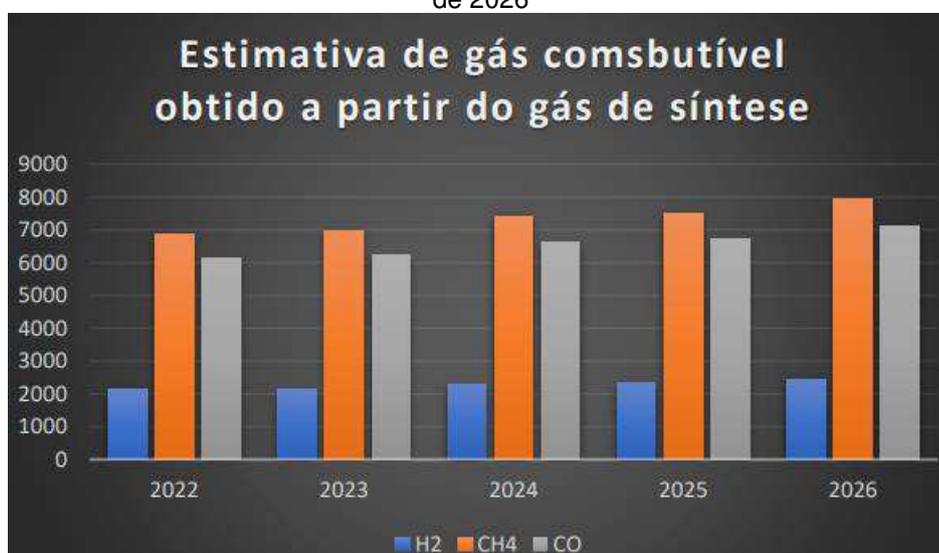
Considerando a implementação de um sistema de gaseificação o qual iniciasse suas atividades no ano de 2023, estima-se uma produção mensal de 3.727,198

toneladas de gás e a obtenção de cerca de 178.905,5 toneladas de gás de 2023 até 2026.

7.3.4.5 Projeção da geração de gases combustíveis

As estimativas das quantidades de hidrogênio, metano e monóxido de carbono que podem ser obtidos a partir do gás de síntese produzido a partir da gaseificação dos resíduos poliméricos encontram-se no gráfico 21.

Gráfico 21. Estimativa da produção de hidrogênio, metano e monóxido de carbono gerados até o ano de 2026



Fonte: autora (2022)

A partir das estimativas realizadas avalia-se que de Setembro de 2021 a Dezembro de 2026 seria possível obter 11974,56 toneladas de H₂, 38.860,72 toneladas de CH₄ e 34.648,66 toneladas de CO.

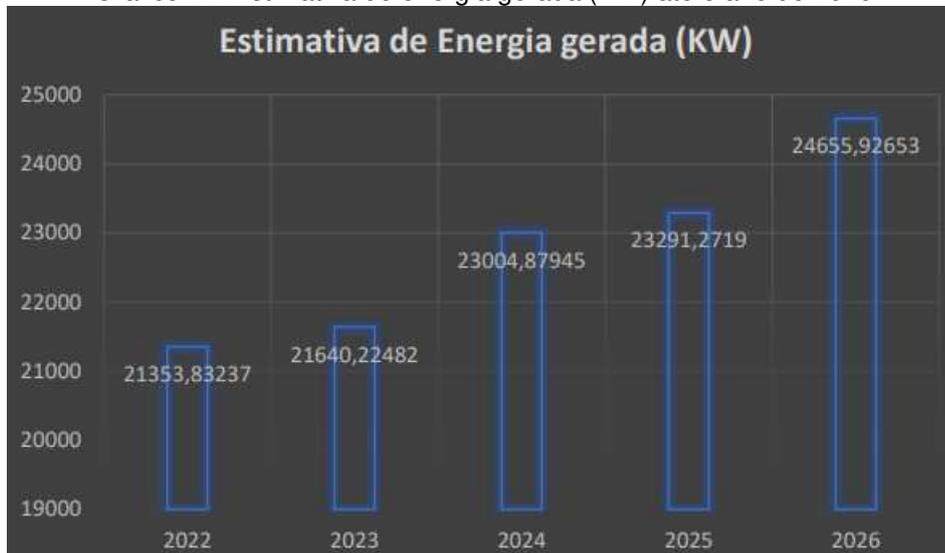
Com a implementação de uma planta de gaseificação que iniciasse suas atividades no ano de 2023, estima-se que, até 2026 seria possível a gerar 9.201,861 toneladas de H₂, 29.862,55 toneladas de CH₄ e 26.625,79 toneladas de CO.

7.3.4.6 Projeção da geração de energia

Além da possibilidade da separação dos gases combustíveis presentes na composição do gás de síntese, uma das rotas químicas para aplicação do gás obtido no processo de gaseificação é a geração de energia.

No gráfico 22 é possível visualizar um da geração de energia, em KW, a partir do gás de síntese produzido na gaseificação dos polímeros presentes no ASCG.

Gráfico 22. Estimativa de energia gerada (KW) até o ano de 2026



Fonte: autora (2022)

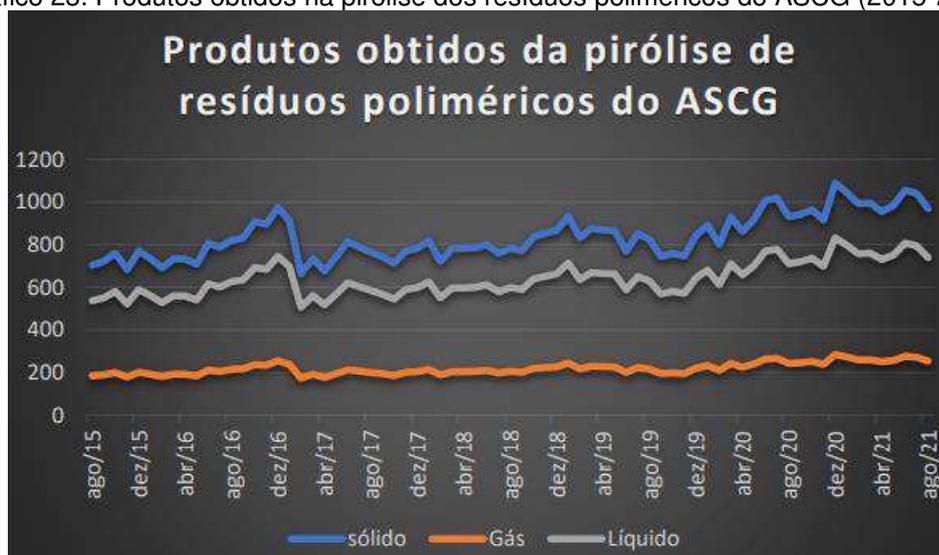
Estima-se que de setembro de 2021 a dezembro de 2026 seria possível gerar cerca de 120.492,2 KW a partir do processo de gaseificação dos polímeros presentes no ASCG com uma planta de geração de energia integrada.

Presume-se que se com a implementação e início as atividades de uma planta de gaseificação no ano de 2023, até 2026 seria gerada uma quantidade igual a 92592,3 KW.

7.3.4.7 Pirólise dos resíduos poliméricos do ASCG - Resíduos poliméricos dispostos de 2015 a 2021

No processo de pirólise obtém-se carvão (fração sólida), gás e o óleo de pirólise. No gráfico 23 encontram-se as estimativas realizadas no que concerne aos produtos obtidos a partir da pirólise dos resíduos poliméricos dispostos no ASCG de 2015 a 2021.

Gráfico 23. Produtos obtidos na pirólise dos resíduos poliméricos do ASCG (2015-2021)



Fonte: Autora (2022)

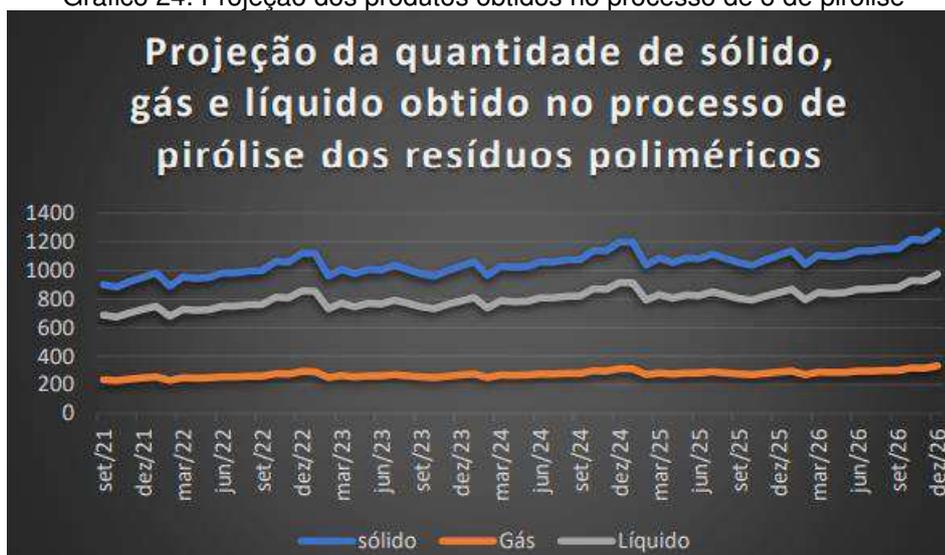
De acordo com as estimativas seria possível produzir em média 837,4404 toneladas mensais de carvão, 218,3448 toneladas mensais de gás e 639,4383 toneladas mensais de óleo de pirólise. Estima-se também que de 2015 a 2021 seria possível a obtenção de 61.133,15 toneladas de carvão, 15.939,17 toneladas de gás e 46.679 toneladas de óleo de pirólise.

7.3.4.8 Projeção dos produtos obtidos no processo de pirólise

Considerando a possibilidade da implantação de um sistema de pirólise no ASCG o qual iniciasse suas operações no ano de 2023 estima-se que até o ano de 2026 seria possível obter 51.716,96 toneladas de carvão, 13.484,1 toneladas de gás e 39.489,14 toneladas de óleo de pirólise, produto de maior interessa, devido suas características.

No gráfico 24 é possível observar as estimativas mensais dos produtos que possivelmente seriam obtidos a partir do processo de pirólise dos resíduos poliméricos do ASCG desde o início de suas atividades até o ano de 2026.

Gráfico 24. Projeção dos produtos obtidos no processo de de pirólise



Fonte: autora (2022)

7.4 MATERIAIS RECICLÁVEIS

O estudo de caso refere-se a conversão dos resíduos poliméricos presentes no ASCG, dessa forma, para implementação do modelo de gaseificação desenvolvido na presente pesquisa é necessário que o RSU presente no aterro sanitário seja devidamente separado.

No tocante a gestão eficiente, a operação de coleta e transporte dos resíduos é uma etapa fundamental e a separação dos recicláveis já na coleta dos RSU seria ideal, dado que evitaria a contaminação dos mesmos com a fração orgânica do lixo coletado. Entretanto, o ASCG recebe resíduos de 60 municípios, além de atender algumas empresas privadas, os quais não realizam a coleta seletiva no momento do transporte.

Para implantação dos processos de tecnologia de conversão térmica dos RSU é necessário que os mesmos passem por um processo de triagem, a fim de separar os resíduos poliméricos presentes no RSU do ASCG. Dessa forma é necessário a implantação de uma central de triagem a fim de viabilizar a conversão e reciclagem dos resíduos.

Após o processo de triagem, o plástico seria encaminhado para gaseificação e os demais materiais recicláveis comercializados, tais ações, além de agregarem valor econômico à administração do ASCG, possibilita uma melhor recuperação energética

dos resíduos, reduziria a quantidade de resíduo disposto e conseqüentemente otimizaria a vida útil do mesmo.

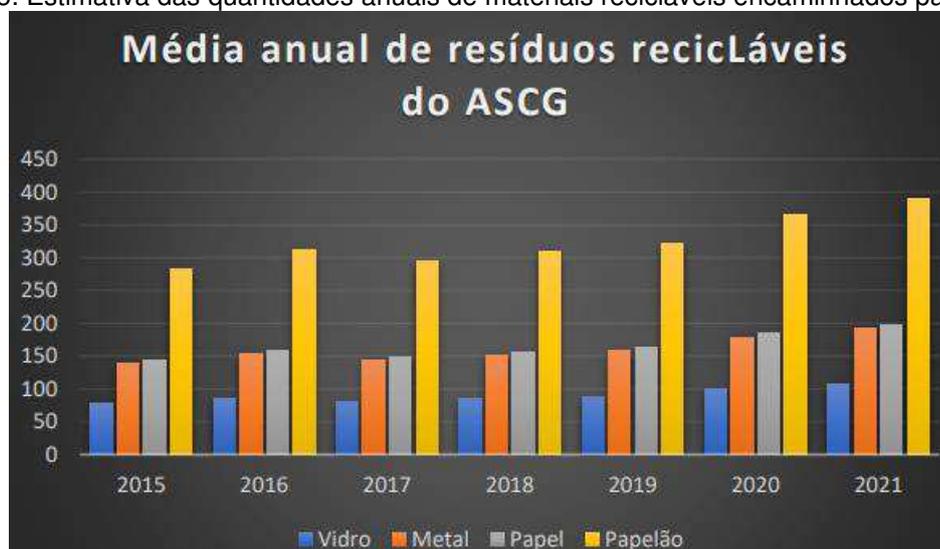
Na tabela 29 e o gráfico 25 apresentam a estimativa das médias anuais, em toneladas, das quantidades de resíduos recicláveis dispostos no aterro sanitário de Campina Grande de Agosto de 2015 a Agosto de 2021.

Tabela 29. Estimativa das quantidades anuais de materiais recicláveis encaminhados para o ASCG

2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Vidro						
77,17061	85,08576	80,5156	84,50909	87,68503	99,64874	106,5937
Metal						
138,6213	152,8392	144,6299	151,8034	157,5083	178,9987	191,4739
Papel						
142,9085	157,5662	149,103	156,4983	162,3797	184,5347	197,3957
Papelão						
282,9589	311,9811	295,2239	309,8667	321,5118	365,3787	390,8435

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 25. Estimativa das quantidades anuais de materiais recicláveis encaminhados para o ASCG



Fonte: Autora (2022)

Assim como os resíduos poliméricos, os resíduos recicláveis encontram-se acumulados no ASCG, os quais poderiam, a partir da implementação de um sistema de coleta seletiva ou até mesmo um processo de triagem, ser destinados a uma reinserção no mercado, aumentando dessa forma a área para disposição e contribuindo economicamente com a administração do aterro.

7.4.1 Projeção dos materiais recicláveis

No gráfico 26 é possível observar a estimativa realizada no que se refere aos materiais recicláveis dispostos no ASCG até o ano de 2026.

Gráfico 26. Projeção dos materiais recicláveis dispostos no ASCG até o ano de 2026



Fonte: autora (2022)

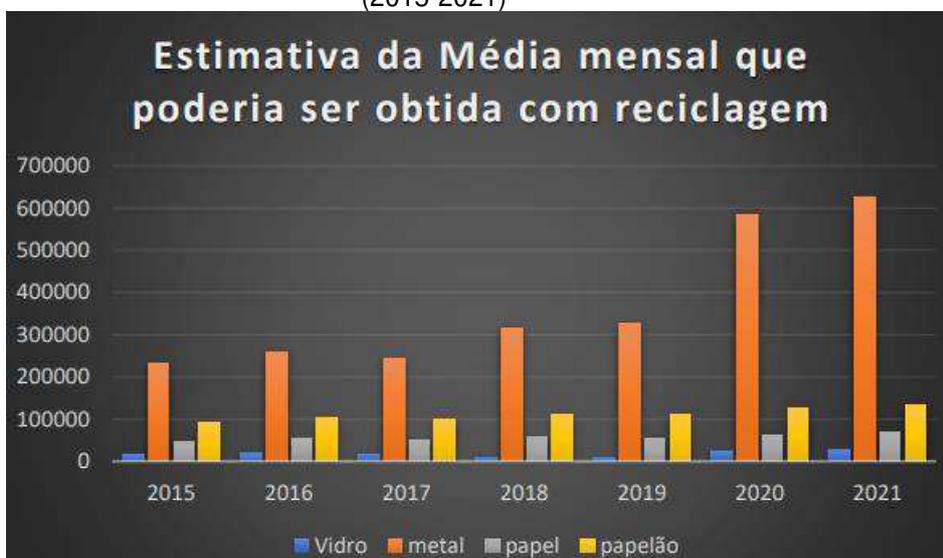
No caso hipotético do padrão do histórico de disposição de RSU no ASCG ser mantido, nos anos seguintes ocorrerá um aumento na disposição e um consequente aumento dos resíduos recicláveis dispostos e acumulados no ASCG. Diante dessa perspectiva nota-se a importância da implementação de um processo de triagem e posterior comercialização dos referidos resíduos visando a maior espaço para disposição e ganho econômico.

7.4.2 Potencial econômico associado aos materiais recicláveis

7.4.2.1 Estimativa do potencial econômico perdido – Materiais recicláveis dispostos no ASCG de 2015 a 2021

Observa-se a partir do gráfico 27 uma estimativa no que se refere ao potencial econômico associado aos resíduos recicláveis (metal, vidro, papel e papelão). Considerando que os resíduos recicláveis dispostos nos anos de 2015 a 2021 não foram comercializados tal potencial foi perdido o que desfavorece a vida útil do aterro e a economia do mesmo.

Gráfico 27. Estimativa da média mensal arrecadada, em reais, com a venda de materiais recicláveis (2015-2021)



Fonte: autora (2022)

Observa-se, a partir do gráfico 27 um maior valor econômico associado aos metais, isso deve-se ao alto valor do alumínio, que aumentou a média de venda dos metais.

Vale destacar que, mesmo com a variação de preços durante os anos, as quantidades que seriam arrecadas a partir da comercialização aumentaram ou forma relativamente constantes. Na tabela 30 é possível observar uma estimativa do total que seria arrecadado caso o vidro, metal, papel e papelão fossem comercializados durante o referido período.

Tabela 30. Estimativa do total arrecadado com a venda dos materiais recicláveis (2015 – 2021)

Quantidade que seria arrecadada (em reais) com materiais recicláveis			
Vidro	Metal	Papel	Papelão
1.206.767	26.923.787	4.078.609	8.075.646

Fonte: Autora (2022)

2.4.2.2 Projeção do potencial econômico dos materiais recicláveis dispostos no ASCG até o ano de 2026

As estimativas das quantidades que podem ser arrecadadas até o ano de 2026 com a comercialização dos resíduos recicláveis do ASCG encontram-se no gráfico 28.

Gráfico 28. Estimativa da quantia arrecada com a comercialização dos materiais recicláveis



Fonte: Autora (2022)

De acordo com a projeção presente no gráfico 26 estima-se que, caso o vidro, metal, papel e plástico dispostos no ASCG sejam comercializados, de setembro de 2021 a Dezembro de 2026 seria possível arrecadar aproximadamente 57.069.412 de reais, correspondentes a 1.714.185 reais obtidos com a comercialização do vidro, 41.953.894 de reais obtidos com a comercialização do metal, 4.497.091 de reais obtidos com a comercialização do Papel e 8.904.241 obtidos com a comercialização do papelão.

Supõe-se que com a implementação de um processo de triagem dos RSU presentes no aterro de campina grande no ano de 2023, seria possível a arrecadação de 43.855.029 de reais até dezembro de 2026, valor arrecadado com a comercialização do vidro, metal, papel e papelão. As estimativas referentes a arrecadação (em reais) de cada ano e a cada categoria de material comercializado encontram-se na tabela 31.

Tabela 31. . Estimativa da quantia arrecada com a comercialização dos materiais recicláveis

Ano	Vidro	Metal	Papel	Plástico
2023	307.865,3	7.534.860	807.671,2	1.599.189
2024	327.279,6	8.010.016	858.603,8	1.700.035
2025	331.353,9	8.109.734	869.292,7	1.721.200
2026	350.768,2	8.584.890	920.225,3	1.822.046
Total	131.7267	32.239.499	345.5793	6.842.470

Fonte: Autora (2022)

7.5 CONCLUSÕES

A localidade foco do estudo de caso reflete a realidade de grandes centros urbanos, visto que, assim como a maioria dos centros urbanos, não dispõem de um sistema de coleta seletiva ou tecnologias de tratamento e reaproveitamento dos materiais recicláveis, à vista disso, o referido estudo estende-se para demais localidades com padrões similares aos do ASCG.

Considerando ainda a localidade e análise da mesma, o levantamento de dados realizado possibilitou observar uma grande quantidade de RSU dispostos e acumulados no ASCG, no período que compreende agosto de 2015 a agosto de 2021 1.201.469 toneladas de RSU foram dispostas no ASCG.

Os dados coletados no que se refere a disposição de RSU no ASCG possibilitou ainda constatar o aumento progressivo dos RSU dispostos no mesmo e de municípios e empresas por ele atendidos, tal aumento resultou na diminuição da vida útil do aterro e caso esse padrão seja mantido ela será ainda mais afetada. De acordo com as inferências realizadas observa-se a tendência do aumento de RSU, estima-se que até 2026 2.524.143 toneladas de RSU estarão acumulados no ASCG.

A partir da análise gravimétrica dos RSU dispostos no ASCG identificou-se um grande potencial referente aos objetivos gerais da referida pesquisa, visto que a fração de resíduos referente a materiais recicláveis é majoritariamente composta por polímeros. Estima-se que das 1.201.469 toneladas de RSU foram dispostas no ASCG de 2015 a 2021 12.3751,3 toneladas seriam de resíduos poliméricos. Vale ressaltar que, tal parcela, de acordo com a análise volumétrica dos RSU do ASCG, contribui de forma significativa para ocupação do aterro o que está diretamente relacionado a vida útil do mesmo.

Diante da análise e dados coletados referentes ao aterro sanitário de Campina Grande constatou-se a necessidade da implementação de tecnologias que possibilitem o aproveitamento dos resíduos neles dispostos, os quais, além de contribuir economicamente com administração do aterro, tornam a gestão mais eficientes e contribui para otimização de sua vida útil que está diretamente relacionada a ocupação o aterro.

As análises e inferências realizadas com base nos dados coletados no que se refere aos ASCG, os resíduos sólidos urbanos nele dispostos e a fração de resíduos poliméricos neles presentes possibilitou conjecturar o potencial energético perdido.

Tal conjectura revelou que a partir da gaseificação dos polímeros dispostos no ASCG entre os anos de 2015 a 2021, seria possível gerar em média 1695,224 toneladas mensais de gás de síntese, o que corresponde a cerca de 211.479,1247 toneladas de gás de síntese no período avaliado.

Pode-se ainda inferir a respeito dos gases combustíveis (H_2 , CO e CH_4) obtidos a partir da obtenção do gás de síntese provenientes da gaseificação dos resíduos poliméricos presentes no ASCG, tal inferência apontou que poderia ter sido produzido 149,0036, 483,5572 e 431,1451 toneladas mensais de hidrogênio, metano e monóxido de carbono respectivamente, correspondentes a um total de 10.877,26 toneladas de hidrogênio, 35.299,67 toneladas de CH_4 e 31.473,59 toneladas de CO durante o período que compreende Agosto de 2015 a Agosto de 2021.

A partir dos resíduos poliméricos e de sua gaseificação é possível ainda a geração de energia, caso os resíduos poliméricos dispostos no aterro de 2015 a 2021 tivessem sido submetidos a gaseificação e com uma planta de geração de potência integrada ao sistema seria possível gerar aproximadamente 109.450,7 KW.

No que se refere ao tratamento térmico dos RSU dispostos no ASCG de 2015 a 2021 a partir do processo de pirólise, estima-se que seria possível obter 61.133,15 toneladas de carvão, 15.939,17 toneladas de gás e 46679 toneladas de óleo de pirólise.

As inferências relativas aos RSU dispostos no ASCG entre 2015 e 2021 e seu hipotético tratamento a partir das tecnologias de conversão térmicas estudadas na presente pesquisa permitiram constatar o desperdício referente ao potencial dos resíduos poliméricos do ASCG, visto que, a partir dos mesmos seria possível a produção de diversos produtos de alto valor agregado, os quais poderiam ser utilizados no próprio aterro ou reinseridos no mercado. Além disto, a referida tecnologia promove uma conversão completa dos polímeros, extinguindo-os assim da natureza e desocupando espaço no aterro, otimizando dessa forma sua vida útil.

Estima-se que, caso uma planta de gaseificação fosse implantada atualmente e desse início a suas atividades no ano de 2023 seria possível gerar mensalmente 3.727,198 toneladas de gás de síntese e que de 2023 a 2026 seria produzido aproximadamente 178.905,5 toneladas de gás de síntese. Essas quantidades, de acordo com a constituição do gás de síntese gerado, permitiriam obter 9201,861 toneladas de H_2 , 29.862,55 toneladas de CH_4 e 26.625,79 toneladas de CO. Presume-se ainda que se com a implementação e início as atividades de uma planta de

gaseificação no ano de 2023, até 2026 seria gerada uma quantidade igual a 92.592,3 KW.

Considerando a possível implementação de uma planta de pirólise para conversão dos RSU no ano de 2023 as estimativas levaram a concluir que com o processo de pirólise dos resíduos poliméricos do ASCG seria possível obter, até o ano de 2026, 51.716,96 toneladas de carvão, 13.484,1 toneladas de gás e 39.489,14 toneladas de óleo de pirólise, produto de maior interessa, devido suas características.

Paralelamente a análise dos resíduos poliméricos presentes no ASCG e os possíveis produtos alcançados, foi constatada quantidade significativa de vidro, metal, papel e papelão, os quais também apresentam significância devido a seu potencial reciclável e econômico associado.

As estimativas apontam que de agosto de 2015 a agosto de 2021, com a comercialização dos materiais recicláveis presentes no ASCG seria possível ter arrecadado 1.206.767 reais correspondentes a comercialização do vidro, 26.923.787 correspondentes a comercialização do metal, 4.078.609 correspondentes a comercialização do papel e 8.075.646 correspondentes a comercialização do papelão. Inferiu-se ainda a respeito da venda dos materiais recicláveis e observou-se que, com a implementação de um processo de triagem dos RSU presentes no aterro de campina grande no ano de 2023, seria possível a arrecadação de 43.855.029 de reais até dezembro de 2026 com a venda de vidro, metal, papel e papelão.

Diante dos dados coletados, análise, inferências realizadas e resultados alcançados, conclui-se que, apesar do aterro sanitário ser considerado uma forma de destinação adequada para os resíduos sólidos urbanos, o mesmo não se configura como uma gestão eficiente, dado que, grande potencial energético e econômico é perdido com a simples disposição dos mesmos, como foi possível observar a partir dos dados expostos.

Finalmente, a realização do estudo de caso permitiu a observância da perda de potencial energético e econômico, o que reflete a situação dos centros urbanos que apresentam cenários semelhantes, além disto, pode-se observar projeções futuras, o que é o ponta pé inicial e incentivo a implementação de novas tecnologias de conversão térmica e de gestão eficiente no ASCG e em centros urbanos em situação similar.

7.6. REFERÊNCIAS

Anuário da reciclagem 2017-2018. Acesso em 05 de Mar. 2022. Disponível em < <https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/2-Anu%C3%A1rio-da-Reciclagem.pdf> >

Anuário da reciclagem 2020. Acesso em 05 de Mar. 2022. Disponível em < https://uploads-ssl.webflow.com/5ebc1f5c7d4b534f7f022f62/5fcaa0d469d1141fbdaf040a_An%C3%A1rio%20da%20Reciclagem%202020.pdf >

Anuário da reciclagem 2021. Acesso em 05 de Mar. 2021. Disponível em < https://uploads-ssl.webflow.com/605512e6bb034aa16bac5b64/61cc5f12957d186a623aebc9_Anua%CC%81rio%20da%20Reciclagem%202021.pdf >

ARAÚJO NETO, Cláudio Luis de; GURJÃO, Renan Ítalo Leite; VIEIRA; VIEIRA, Elba Magda se Souza; OLIVEIRA, João Keverson Lima de; MONTEIRO, Veruska Escarião Dessoles. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos depositados no aterro sanitário em Campina Grande-Pb.** I Congresso Internacional de meio ambiente e sociedade II congresso internacional da diversidade do semiárido. Nov. 2019. Acesso em: 28 de Nov. 2021. Disponível em < <https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/63363>>

ARAÚJO NETO, Cláudio Luis de. **Análise Do Potencial Econômico Dos Resíduos Sólidos Recicláveis Da Cidade De Campina Grande** – PB. Monografia (Especialização em Gestão e Auditoria ambiental) Universidade Estadual a Paraíba. Campina Grande – PB, 2018. Acesso em: 28 de Nov. 2021. Disponível em < <http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/22305/6/PDF%20-%20Cl%C3%A1udio%20Luis%20de%20Ara%C3%BAjo%20Neto.pdf> >

CEZÁRIO, Janaína Aparecida. **Previsão da geração de resíduos sólidos urbanos para o aterro sanitário no município de Campina Grande-PB.** 72 p. Dissertação ((Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2022. Acesso em: 02 de Mar. de 2022. Disponível em < <http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/tede/4230/2/PDF%20-%20Jana%c3%adna%20Aparecida%20Cez%c3%a1rio%20> >

COSTA, Lineker Tavares da. **Análise da composição e do peso específico dos resíduos sólidos urbanos com um ano de aterramento dispostos em aterro sanitário.** 41 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências Tecnológicas e Recursos Naturais, 2019. Acesso em: 05 Abr. 2021. Disponível em < <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/23581> >

ECOSAM. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Campina Grande-PB. João Pessoa: ECOSAM, 2014

GURJÃO, Renan Ítalo Leite; DE ARAÚJO NETO, Cláudio Luis; DE PAIVA, William. **Avaliação do tempo de vida útil do aterro sanitário em Campina Grande–PB.** Congresso Nacional de pesquisa e ensino em ciências (CONPESC), 2020. Acesso em: - 4 Abr. 2022. Disponível em <
https://www.editorarealize.com.br/editora/ebooks/conapesc/2019/PROPOSTA_EV126_MD4_ID1657_06082019120109.pdf >

IBGE. Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017. Rio de Janeiro, 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. 2021. Acesso em: 28 de Out. de 2021. Disponível em <
<http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/22305/6/PDF%20-%20Cl%C3%A1udio%20Luis%20de%20Ara%C3%BAjo%20Neto.pdf>>

MACEDO, Maria José Herculano; GUEDES, Roni Valter de Souza; SOUSA, Francisco de Assis Salviano. **Monitoramento e intensidade das secas e chuvas na cidade de Campina Grande/PB.** Revista brasileira de climatologia, vol. 8, 2011. Acesso em: 28 de Out. de 2021. Disponível em <
file:///C:/Users/Jacyelli/Pictures/MONITORAMENTO_E_INTENSIDADE_DAS_SECAS_E_CHUVAS_NA_.pdf>

CAPÍTULO 8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento do processo de pirólise de polímeros foi caracterizado a partir da modelagem do processo no Aspen Hysys, por sua vez, devido sua maior robustez e complexidade, o modelo de gaseificação de polímeros foi modelado e caracterizado no Aspen Plus.

A similaridade dos resultados obtidos nos modelos computacionais com dados experimentais extraídos da literatura para os processos de pirólise e de gaseificação permitem concluir que os modelos propostos para ambas as tecnologias de conversão térmica é verossímil e é uma alternativa para avaliar quantitativamente e qualitativamente a conversão do polímero em carvão, óleo e gases no que se refere ao processo de pirólise e a conversão de polímeros em gás de síntese no caso do modelo do processo de gaseificação.

Outrossim, o modelo do processo de gaseificação proposto na presente pesquisa fornece ainda a possibilidade da análise quanto a conversão dos polímeros em eletricidade a partir de sua integração ao modelo de um motor ciclo Otto, o qual possibilitou conjuntamente com o modelo de produção de gases (gaseificação) a avaliação da energia útil que pode ser obtida a partir da conversão de resíduos poliméricos.

Ao desenvolver os modelos supracitados foi possível realizar uma análise comparativa dos processos, principalmente no que se refere ao produto final dos mesmos, nesse seguimento foi possível observar que:

- Ambos os processos são adequados do ponto de vista ambiental, visto que, eliminam o resíduo do meio ambiente;
- Tanto o processo de gaseificação quanto o processo de pirólise possibilitam a conversão dos polímeros em produtos de alto valor agregado e com grande potencial comercial;
- Embora ambos os processos gerem produtos de alto valor, o principal produto do processo de pirólise, o óleo de pirólise, apesar de apresentar propriedades similares a de combustíveis convencionais, a exemplo da densidade e viscosidade dinâmica, apresenta diversos problemas quando utilizado como combustível, desta forma, o mesmo encontra-se em fase de estudos e otimização;

- Os gases produzidos no processo de pirólise poderiam ainda ser utilizados para produção de energia, entretanto, o processo de gaseificação, levando em consideração a composição e aplicabilidade do gás de síntese, apresenta-se mais promissor para tal finalidade;
- Quanto a aplicabilidade do produto final, foi nítida as vantagens no que se refere ao gás de síntese, dada a gama de rotas químicas que o mesmo apresenta, necessitado apenas da purificação do gás ao deixar o gaseificador.

Tais observações permitiram concluir que ambos os processos são promissores para o tratamento de resíduos poliméricos, no entanto, é importante destacar que o processo de pirólise ainda se encontra em desenvolvimento, principalmente no tocante a aplicabilidade de seu produto final, por sua vez, o processo de gaseificação apresenta-se mais consolidado e viável no que se refere ao uso e comercialização do produto obtido.

A partir da análise dos produtos obtidos no processo de pirólise e gaseificação é possível perceber a significância ambiental, energética e até mesmo econômica de sua aplicação no tratamento dos resíduos poliméricos. O estudo de caso realizado no ASCG permitiu constatar com maior nitidez esta significância e mensurar o potencial energética perdido na referida localidade o qual pode ser estendido aos demais aterros brasileiros em situação similar.

Por meio do estudo de caso foi possível verificar que o ASCG tem um enorme potencial energético, tendo em vista que o aterro chega a receber em média 650 toneladas ao dia de RSU. Estima-se que até 2021 aproximadamente 1.201.469 toneladas de RSU encontravam-se acumulados no ASCG e dessa quantidade 123.751,3 toneladas eram de resíduos poliméricos, os quais poderiam ser convertidos em produtos passíveis de serem comercializado e inseridos no mercado.

Com os resíduos poliméricos dispostos no ASCG desde o início de suas atividades até agosto de 2021 seria possível obter 211.479,1247 toneladas de gás de síntese e a partir desse gás de síntese seria possível a obtenção das seguintes quantidades de gases combustíveis: 10.877,26 toneladas de hidrogênio, 35.299,67 toneladas de CH₄ e 31.473,59 toneladas de CO.

Destaca-se ainda a possibilidade da geração de energia elétrica a partir dos resíduos poliméricos, as estimativas apontam que a partir dos resíduos poliméricos do ASCG seria possível, até agosto de 2021 gerar cerca de 109.450,7 KW.

Destaca-se ainda, a influência significativa do acúmulo de RSU e mais especificamente dos resíduos poliméricos na vida útil do aterro, que obriga a gestão a otimizar e modificar seu espaço de modo a suprir a grande demanda de resíduos.

Nessa perspectiva evidencia-se a necessidade de uma gestão eficiente no ASCG, a qual priorize o aproveitamento energético dos polímeros e destine apenas os resíduos não recicláveis ao tratamento final, pois, vale destacar, o grande potencial econômico e reciclável perdido devido aos demais materiais recicláveis, estima-se que, até agosto de 2021, o aterro poderia ter arrecadado aproximadamente R\$ 40.284.809 com a comercialização do metal, papel, papelão e vidro.

Desse modo, a implementação de uma planta de gaseificação, considerada mais viável entre as duas tecnologias abordadas na presente pesquisa no que se refere ao produto final, tornaria a gestão do ASCG mais eficiente além de contribuir de forma significativa com o meio ambiente e a vida útil do mesmo. Além disto, vale ressaltar que as estimativas apontam uma continuidade no crescimento dos RSU dispostos na localidade e a implementação do processo de gaseificação possibilitaria obter, de 2023 a 2026, 178.905,5 toneladas de gás de síntese e gerar 92.592,3 KW.

Além disto, a implantação de um processo de triagem e comercialização dos materiais recicláveis em paralelo com a implantação da tecnologia de conversão térmica mencionada anteriormente, possibilitaria arrecadar aproximadamente R\$ 43.855.029 entre os anos de 2023 e 2026.

As análises e dados expostos no estudo de caso desenvolvido permitem constatar a significância das tecnologias de conversão térmica aplicadas ao tratamento de resíduos de polímeros, além disto, levando em consideração a grande quantidade de Municípios brasileiros em situação similar ao ASCG as análises realizadas para a referida localidade são base e refletem o potencial energético perdido de grandes centros urbanos os quais apenas realizam a simples disposição final dos polímeros.

Finalmente, foi possível concluir, a partir da presente pesquisa, que o processo de gaseificação pode ser proposto como uma alternativa viável dentro do plano de gestão de resíduos sólidos urbanos do ASCG e de grandes centros urbanos com situação similar, visto que, o mesmo converte os polímeros em um produto de alto valor agregado, o qual apresenta uma gama de aplicações.

Em termos gerais, pode-se concluir que o presente estudo contribuiu de forma significativa com temas atuais e de extrema significância mundial e acadêmica

auxiliando na resolução de problemas ambientais e ainda na utilização de fontes de alternativas de energia, associado a isto, a presente tese engloba ainda temas relacionados à disposição final e reaproveitamento de resíduos sólidos, ocupação e vida útil de aterros sanitários, crise energética, saúde pública além do grande incentivo aos avanços das tecnologias de conversão térmica.