



JORGE TIAGO COSTA DUARTE

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DO
POLIESTIRENO PARA OBTENÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE**

JORGE TIAGO COSTA DUARTE

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DO
POLIESTIRENO PARA OBTENÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Colegiado de Curso da Engenharia Química
do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da
Universidade Federal do Maranhão, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Jaiver Efren Jaimes Figueroa

Coorientador: Prof. Dr. Valter Nunes Trindade Junior

DADOS CURRICULARES**Jorge Tiago Costa Duarte****NASCIMENTO** 01/06/1994 – São Luís / MA**FILIAÇÃO** Hildete Costa Duarte
Jorge Antônio Sousa Duarte**2013/2023** Curso de Graduação:
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Duarte, Jorge Tiago Costa.

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DO POLIESTIRENO
PARA OBTENÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE / Jorge Tiago Costa
Duarte. - 2023.

51 f.

Coorientador(a): Valter Nunes Trindade Junior.

Orientador(a): Jaiver Efren Jaimes Figueroa.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís-MA, 2023.

1. Gaseificação. 2. Plásticos. 3. Resíduos sólidos.
4. Simulação. I. Figueroa, Jaiver Efren Jaimes. II.
Junior, Valter Nunes Trindade. III. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JAIVER EFREN JAIMES FIGUEROA
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. ELMO DE SENA FERREIRA JUNIOR
DEEQ/CCET/UFMA

Dr. DOMINGOS SERGIO ARAUJO SILVA
PETROBRAS TRANSPORTE

16 de agosto de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de forma significativa para a conclusão desta monografia. Sem o apoio e incentivo dessas pessoas especiais, esse trabalho não seria possível.

Agradeço em primeiro lugar à minha amada mãe, Hildete, cujo amor incondicional e constante apoio foram a força motriz por trás de cada passo que dei em direção a este objetivo. Sua presença e palavras de encorajamento foram a âncora que me sustentou durante os momentos desafiadores.

Também sou grato a minhas avós, Maria do Carmo e Ildener. Suas histórias de vida e sabedoria compartilhada me inspiraram e me lembraram das minhas raízes, mantendo-me conectado com minha identidade e origens.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Jaiver, por sua orientação perspicaz e paciência ao longo do processo de desenvolvimento desta monografia. Suas orientações e feedbacks foram inestimáveis para aprimorar minha pesquisa e alcançar os melhores resultados possíveis.

Além disso, agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Valter, por suas contribuições valiosas e apoio ao longo deste trabalho. Sua expertise enriqueceu o conteúdo desta monografia e me incentivou a buscar excelência em minha jornada acadêmica.

Por fim, expresso minha gratidão a todos os meus amigos e colegas que, de alguma forma, contribuíram para este projeto e caminharam comigo nessa jornada intelectual, em especial para a Luiza, Mauricio, Paulo e Ananda que acompanharam mais de perto toda minha trajetória da graduação e a Julia e Diego por estarem comigo desde a infância até hoje, por evoluirmos juntos e sempre estar presente não só nas alegrias como também nas dores e sofrimentos.

A todos vocês, meu mais profundo obrigado por fazerem parte desta conquista e por tornarem esta trajetória memorável e significativa. Suas influências e apoio foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Muito obrigado a todos.

“Exu matou um pássaro ontem com a pedra que só
jogou hoje.”

Ditado Iorubá

DUARTE, Jorge Tiago Costa. **Simulação do Processo de Gaseificação do Poliestireno Para Obtenção de Gás de Síntese**. 2023. 51. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

RESUMO

A gaseificação é uma das diversas formas promissoras de produção de energia, oferecendo potenciais aplicações para o gás de síntese (*Syngas*), um dos seus principais produtos, e contribuindo para uma destinação mais sustentável de resíduos sólidos, especialmente materiais plásticos. Neste trabalho, foi realizado um estudo visando avaliar os principais parâmetros que influenciam o processo de gaseificação, utilizando simulação computacional através do software Aspen Plus, para evidenciar o potencial da gaseificação de materiais plásticos, em específico do poliestireno. Neste trabalho foi estudado a influência de parâmetros operacionais do processo, como a temperatura de gaseificação e a quantidade de ar utilizada (representada pela razão de equivalência ER), sobre a composição do gás obtido, com foco principal no H₂ e CO, assim como a presença de gases poluentes, como o dióxido de carbono. É importante destacar que, embora a gaseificação seja realizada industrialmente em um equipamento único, para efeito da simulação o processo foi dividido em etapas para poder realizar a implementação e facilitar a análise no software. Nesse sentido, o processo foi dividido em pirólise e gaseificação propriamente dita, os quais ocorreram em equipamentos diferentes neste trabalho de simulação. Com base nos resultados observou-se que o processo ocorrendo de forma adiabática atingiu uma eficiência de gás frio de 72% contendo altas quantidades de H₂ para uma faixa de ER entre 0,1 e 0,2. Embora este estudo dependa de algumas considerações específicas, os resultados dos rendimentos obtidos se encontram próximos aos de valores da literatura o que mostra que o uso desta simulação pode ser usada com fins preditivos, o que permite concluir, pelos resultados obtido, o potencial promissor para a gaseificação de resíduos plásticos, além de fornecer uma ferramenta sólida para estudos mais aprofundados sobre o assunto.

Palavras-chave: Gaseificação. Simulação. Resíduos sólidos. Plásticos.

DUARTE, Jorge Tiago Costa. **Simulação do Processo de Gaseificação do Poliestireno Para Obtenção de Gás de Síntese**. 2023.51. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023

ABSTRACT

Gasification is one of the various promising methods of energy production, offering potential applications for synthesis gas (Syngas), one of its main products, and contributing to a more sustainable disposal of solid waste, especially plastic materials. In this study, an assessment was conducted to evaluate the key parameters influencing the gasification process, using computational simulation through the Aspen Plus software, to highlight the potential of plastic materials gasification, specifically polystyrene. The influence of operational parameters, such as gasification temperature and the amount of air used (represented by the equivalence ratio ER), on the gas composition was studied in this work, with a primary focus on H_2 and CO, as well as the presence of pollutant gases such as carbon dioxide. It is important to note that while gasification is industrially conducted in a single unit, for the purposes of simulation, the process was divided into stages to facilitate implementation and analysis in the software. Thus, the process was divided into pyrolysis and gasification proper, each occurring in different equipment in this simulation work. Based on the results, it was observed that the adiabatic process achieved a cold gas efficiency of 72%, containing high levels of H_2 for an ER range between 0.1 and 0.2. Although this study depends on certain specific considerations, the yield results are close to values found in the literature, indicating that this simulation can be used for predictive purposes, allowing the conclusion, from the obtained results, of the promising potential for plastic waste gasification, in addition to providing a robust tool for further in-depth studies on the subject.

Keywords: Gasification. Simulation. Solid waste. Plastics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil: a) ano 2010 e b) ano 2019.	4
Figura 2- Análise gravimétrica (% mássica) dos RSU no Brasil no ano de 2020	5
Figura 3-Principais resinas plásticas consumidas no Brasil em 2019	6
Figura 4-Fluxograma do Processo	17
Figura 5- Composição do gás produzido com reator adiabático.	23
Figura 6- Composição do gás produzido à 600°C	24
Figura 7- Composição do gás produzido à 800 °C	25
Figura 8- Composição do gás produzido à 1000 °C	26
Figura 9- Composição do gás produzido com ER 0,1	27
Figura 10- Composição do gás produzido com ER 0,3	27
Figura 11- Composição do gás produzido com ER 0,5	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Componentes presentes no processo estudado.....	15
Tabela 2-Blocos utilizados no processo de gaseificação.....	18
Tabela 3- Características da alimentação	18
Tabela 4- Parâmetros de Operação do Modelo	19
Tabela 5 - Rendimento mássico no reator PYROL	19
Tabela 6 - Reações de gaseificação que ocorrem no bloco RPlug (GASIFIER)	20
Tabela 7-Massa de ar no sistema de acordo com o valor de ER.	22
Tabela 8 - Comparação do rendimento com outros estudos de gaseificação de materiais plásticos.	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais .

EVA – Poliacetato de Etileno Vinil.

ID – Identificação.

PCI – Poder Calorífico Inferior.

PCS – Poder Calorífico Superior.

PVC – Policloreto de Vinila.

PS – Poliestireno.

PEAD – Polietileno de Alta Densidade.

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade.

PEBDL – Polietileno de Baixa Densidade Linear.

PET– Polietileno Tereftalato.

PP – Polipropileno.

PU – Poliuretano.

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos.

Syngas – Gás de síntese (*Synthesis gas*).

LISTA DE SÍMBOLOS

ER	Razão de equivalência (<i>Equivalence Ratio</i>).
GE	Eficiência de gaseificação.
GY	Rendimento da gaseificação.
m_{pw}	Vazão mássica de resíduos plásticos na alimentação (kg/h).
Q_{syngas}	Vazão volumétrica de <i>syngas</i> (m ³ /h).
%N	Porcentagem volumétrica de nitrogênio.

SUMÁRIO

DADOS CURRICULARES	III
AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo Geral	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	3
3.2 Resíduos Plásticos	5
3.3 Tratamento De Resíduos Sólidos Urbanos	7
3.3.1 COMPOSTAGEM	7
3.3.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA	8
3.3.3 INCINERAÇÃO	8
3.3.4 RECICLAGEM	9
3.4 Processos Termoquímicos	9
3.4.1 GASEIFICAÇÃO	10
3.4.1.1 Gaseificação de Resíduos Plásticos	11
4. MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1 Considerações	14
4.2 Componentes da Simulação	15
4.3 Métodos e Propriedades Físicas	16
4.4 Descrição do Modelo	16
4.4.1 Sequência do Modelo	19
4.5 Análise de Sensibilidade	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1 Influência da Razão de Equivalência	22
5.2 Eficiência do Processo	28
6. CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

O acúmulo de resíduos plásticos no planeta é uma preocupação ambiental crescente, por não serem biodegradáveis e demorarem vários anos para que possam desaparecer naturalmente, caindo em rios e mares, intoxicando a fauna presente, entupindo os sistemas de esgoto e causando inundação nas ruas. O Brasil é o quarto maior gerador de lixo plástico no mundo, com 11,3 milhões de toneladas por ano, reciclando apenas 1,28% do plástico produzido (BARBOSA, 2019).

Segundo Gewert et al (2015), ao estudar os caminhos de degradação dos detritos que se encontravam flutuando no oceano, mais de 60 % dos resíduos encontrados eram plásticos, com projeção de aumento a cada ano. Esses detritos plásticos podem ser divididos de acordo com sua estrutura química: há o grupo que possui heteroátomo na sua cadeia principal, como o polietileno tereftalato (PET) e o poliuretano, e aqueles que não possuem heteroátomo na sua cadeia principal, como polipropileno (PT), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC). Dentre estes, o PS é o polímero termoplástico que mais demora a degradar na natureza.

Sendo um polímero versátil o poliestireno desempenha um papel crucial em diversas indústrias devido às suas propriedades únicas dentre essas a indústria de embalagens e acondicionamento em que é empregado em produtos descartáveis, como copos e talheres, bem como em itens duráveis, como jarras e potes. Sua versatilidade se estende à criação de caixas e suportes de transporte, garantindo a proteção de objetos sensíveis durante o transporte e minimizando danos (MONTENEGRO; SERFATY, 2015). Do total de materiais identificados no programa "Lixo Fora D'Água", conduzido pela ABRELPE em 2021, 56,5% consistiam em plásticos, dos quais 14% eram compostos por poliestireno (ABRELPE, 2023).

Dessa forma desenvolver métodos de reciclagem se torna essencial para a diminuir a quantidade de plástico que chega no oceano. Dentre os diferentes meios para reciclagem, as rotas termoquímicas surgem como uma alternativa por permitir a transformação desse material poluente em produto de grande interesse econômico. A gaseificação é um exemplo de processo termoquímico que tem como produto principal o gás de síntese, combustível que pode ser utilizado em motores ou caldeiras para a produção de energia e como bloco construtor de um grande número de componentes químicos (PUC RIO, 2005).

A simulação de um processo químico visa analisar a viabilidade de um processo variando a rota e material em uma escala reduzida para posterior análise de dados e ampliação de escala. A utilização de softwares para realizar essas simulações tornou os processos de simulação viáveis e com maior atratividade pela indústria. O Aspen Plus é um desses softwares que utiliza uma extensa base de dados de elementos, compostos e modelos termodinâmicos, possibilitando testar e simular diversos processos em diferentes condições de operação (VAQUERIZO; COCERO, 2018).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar tecnicamente o processo de gaseificação do poliestireno visando a produção de gás de síntese empregando o software Aspen Plus V8.8.

2.2 Objetivos Específicos

- Simular o processo de gaseificação utilizando dados operacionais da literatura.
- Determinar as condições operacionais que favoreçam a produção de *Syngas*.
- Realizar um estudo comparativo da qualidade do gás produzido neste trabalho com estudos da literatura semelhantes, avaliando a quantidade, pureza e poder calorífico do gás produzido.
- Determinar o consumo energético para a produção do *Syngas* usando o processo de gaseificação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

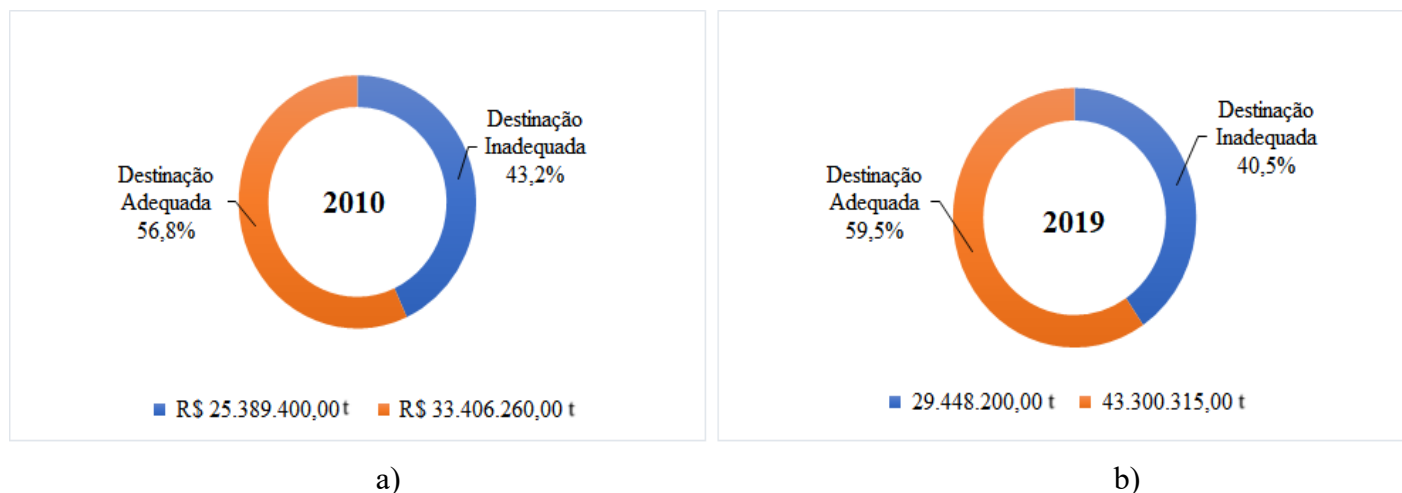
Resíduo é uma Substância que resta depois de uma operação ou manipulação industrial, podendo ser reaproveitada. Em outras palavras, os resíduos ainda possuem algum valor econômico que pode ser aproveitado pelas indústrias, por cooperativas de catadores e outros componentes da cadeia produtiva (MICHAELIS, 2021).

Segundo ABNT (2004) os resíduos nos estados sólido e semissólido, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluídos também os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

No Brasil em 2019 foram produzidos 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos o que representa um aumento de 19 % em um intervalo de 10 anos, por consequência a produção per capita passou de 348,3 kg/hab no ano de 2010 para 379,2 kg/hab em 2019. Em contrapartida a cobertura de coleta dos RSU também aumentou na última década passando de 88% para 92% nesse intervalo o que representa 72,7 milhões de toneladas de resíduo coletados em 2019 (ABRELPE, 2020).

Os RSU coletados precisam de uma destinação final ambientalmente adequada prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) para que seja observado as normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. Dessa forma no Brasil a maior parte dos RSU coletados seguem para aterros sanitários sendo registrado na última década um aumento de 10 milhões de toneladas, passando de 33 milhões de toneladas para 43, em contra partida a quantidade de resíduos que seguiram uma destinação inadequada também aumentou passando de 25 para 29 milhões de toneladas como podemos ver na Figura 1. O caminho da disposição inadequada onde foram 40,5% do que foi coletado em 2019 é os lixões ou aterros controlados que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteger o meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2020).

Figura 1-Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil: a) ano 2010 e b) ano 2019.



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

Iniciativas para a redução de material descartado de maneira inadequada como a coleta seletiva cresceu na última década em todas as regiões do Brasil passando a existir em 4070 municípios em 2019 o que representa 73,1% do Brasil, ainda assim em muitos municípios a atividade da coleta seletiva não abrange a totalidade de sua área urbana (ABRELPE, 2020). Uma vez que esses resíduos chegam em aterros controlados e lixões eles começam a se decompor comprometendo a qualidade do solo, água e ar por serem fontes de compostos orgânicos voláteis, pesticidas, solventes e metais pesados, entre outros (GOUVEIA, 2012).

A matéria orgânica presente nos RSU ao se decompor forma um líquido de cor escura chamado chorume, principal responsável pelo comprometimento das águas superficiais e/ou lençóis freáticos, ocasionando no solo o acúmulo de gases tóxicos e explosivos que se acumulam no subsolo e podem ser lançados na atmosfera. Dessa forma os locais de armazenamento inadequado tornam-se propício para a proliferação de vetores e agentes transmissores de doença, podendo haver também a emissão de partículas e outros poluentes atmosféricos, diretamente pela queima de lixo ao ar livre ou pela incineração de dejetos sem o uso de equipamentos de controle adequados e assim os impactos dessa degradação estendem-se para além das áreas de disposição final dos resíduos, afetando toda a população (GOUVEIA, 2012).

A gestão e eliminação dos RSU envolve diferentes órgãos da administração pública, do setor produtivo e da sociedade civil com o propósito de realizar a limpeza urbana, a coleta, o tratamento e a disposição final dos resíduos, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida da população por meio da limpeza das cidades. Para tanto é preciso considerar as características das fontes de produção, o volume e os tipos de resíduos gerados, as características sociais, culturais e econômicas dos cidadãos e as peculiaridades demográficas, climáticas e urbanísticas

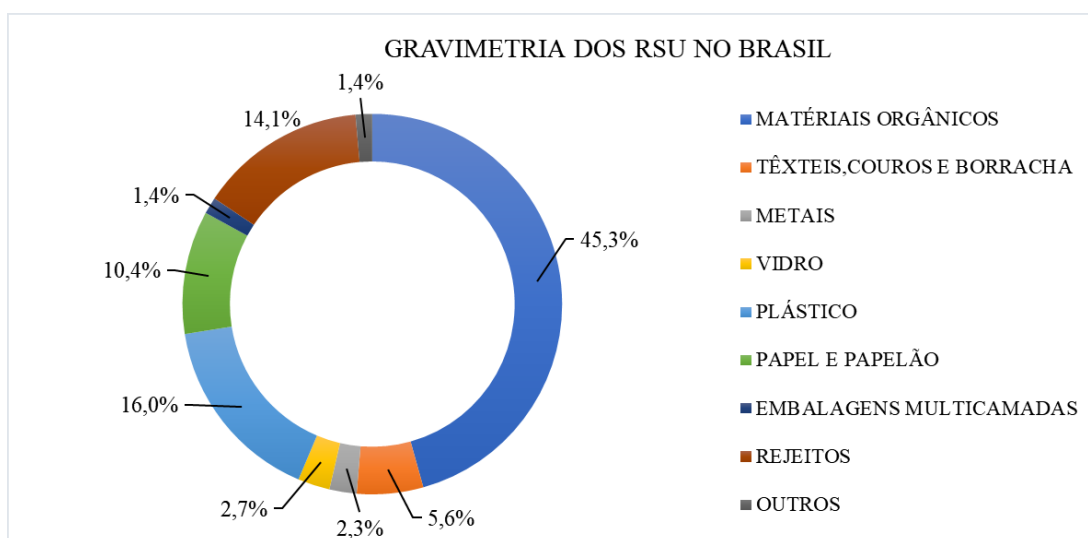
locais, para que se possa dar aos resíduos, tratamento diferenciado e disposição final técnica e ambientalmente adequadas (MONTEIRO *et al.*, 2001).

3.2 Resíduos Plásticos

Com o crescimento acelerado das cidades, o tipo de resíduos gerados mudou. A quantidade de embalagens nos resíduos urbanos, por exemplo, é cada vez maior. Por isso eles estão cada vez mais volumosos (REZENDE *et al.*, 2013). Os plásticos transformados em embalagens ou outros bens de consumo de curta duração, que possuem um ciclo de vida breve de até um ano, ou moderado, que varia de 1 a 5 anos antes de se tornarem resíduos, representaram 51% do total de plástico consumido em 2017. Dentre esses, 35,8% eram plásticos com um período curto de uso, potencialmente sendo utilizados apenas uma vez antes do descarte, na pior das hipóteses (ABIPLAST, 2019).

A análise gravimétrica se refere a categorização dos tipos de materiais descartados pela população, sendo de grande importância para a correta gestão dos resíduos, dessa forma como podemos observar na Figura 2 os plásticos são a segunda maior participação nos RSU em 2020 somando um total de 13,35 milhões de toneladas descartadas nesse ano. Na mesma figura percebe-se que os materiais orgânicos são o principal componente dos RSU, com 45,3% já os resíduos recicláveis secos somam 35%, sendo compostos principalmente pelos plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), além dos vidros (2,7%), metais (2,3%), e embalagens multicamadas (1,4%), que consistem em embalagens compostas de mais de um tipo de material. Os rejeitos, por sua vez, correspondem a 14,1% do total e contemplam, principalmente, os materiais sanitários (ABRELPE, 2020).

Figura 2- Análise gravimétrica (% mássica) dos RSU no Brasil no ano de 2020.

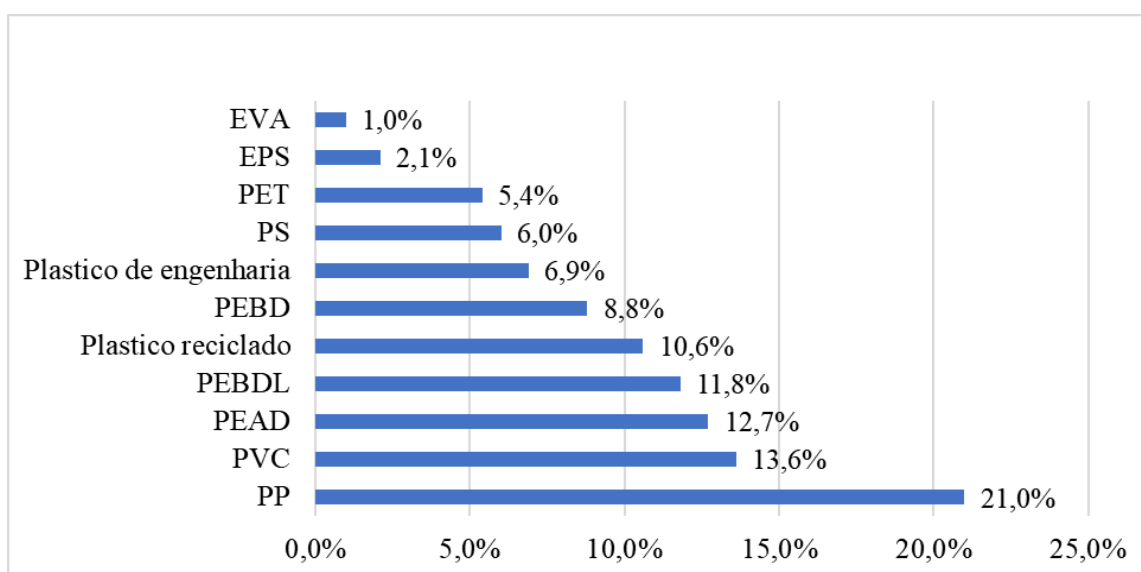


Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020).

Os plásticos se dividem em dois grandes grupos, termoplásticos e termofixos. Os termofixos são aqueles que sofrem reações químicas em sua moldagem as quais impedem uma nova fusão, portanto não são recicláveis. Os termoplásticos não sofrem alterações químicas quando aquecidos e depois de resfriadas podem novamente passar pelo processo de fundição, podendo ser remoldados (LANDIM *et al.*, 2016).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico ABIPLAST (2019) os polímeros mais consumidos no Brasil são: Plástico reciclado; Polietileno tereftalato (PET); Polietileno de alta densidade (PEAD); Policloreto de vinila (PVC); Polietileno de baixa densidade (PEBD); Polipropileno (PP); Poliestireno (PS); Espuma Vinílica Acetinada (EVA); Poliestireno expandido (EPS). Além das citadas temos também os plásticos de engenharia que são produzidos para aplicação específica como a Acrilonitrila butadieno estireno (ABS); Poliuretanos, entre outros. A Figura 3 mostra a porcentagem de consumo dessas resinas plásticas em 2019.

Figura 3-Principais resinas plásticas consumidas no Brasil em 2019.



Fonte: Adaptado de ABIPLAST (2019).

Geralmente, os resíduos plásticos seguem uma hierarquia de gerenciamento: Reduzir, Reusar, Reciclar e por fim recuperação de energia. Apesar da reutilização parecer ser a melhor opção para a redução de resíduos plásticos, com o tempo se torna impraticável devido a sua degradação. A reciclagem mecânica envolve custos significantes relacionados a separação e coleta, além de não ser recomendado para a indústria farmacêutica e alimentícia enquanto a reciclagem química foca em transformar o plástico em produtos gasosos ou líquidos que são usados em diversos processos petroquímicos como recuperação de energética, em que se utiliza o poder calorífico armazenado nos plásticos para a geração de energia térmica que será usado em diversas plantas de operacionais (KANNAN; SHOAIBI; SRINIVASAKANNAN, 2012).

O PS tem um histórico notável de produção em escala comercial desde a década de 1930, quando aconteceu sua introdução na indústria, desempenhando um papel importante como termoplástico, seu uso popular em vários setores se deve à sua ampla gama de aplicações industriais, que incluem isolamento térmico, embalagem e processos de termoformagem. O Brasil produzia em 2001, o equivalente a 64% de todo o poliestireno presente no mercado Sul – Americano, no entanto a quantidade de PS que foi reciclado é desprezível em relação a quantidade que foi consumida, situação que ocorre mesmo em países desenvolvidos (MONTENEGRO; SERFATY, 2015).

3.3 Tratamento De Resíduos Sólidos Urbanos

O Tratamento de RSU pode ser entendido como uma série de procedimentos físicos, químicos e biológicos que tem objetivo diminuir a poluição ambiental, reduzir os impactos sanitários negativos e gerar benefícios econômicos dos resíduos (GRS-UFPE, 2014). Dessa forma o tratamento dos resíduos sólidos pode assumir diversos caminhos como a compostagem digestão anaeróbica incineração, reciclagem e processos termoquímicos (VERGARA; TCHOBANOGLOUS, 2012).

3.3.1 COMPOSTAGEM

A compostagem é um processo de decomposição e estabilização da fração orgânica dos RSU realizado por microrganismos aeróbicos. Na prática o sistema de compostagem podem ser fechados ou abertos assim como podem ser realizados em uma escala municipal ou em casa de maneira individual (VERGARA; TCHOBANOGLOUS, 2012). Um dos processos de reciclagem mais antigos utilizados pelo homem porem sua filosofia é uma das mais atualizadas para cumprir as exigências modernas pois trata-se de um sistema comprometido com os aspectos ambientais (devido ao tratamento dos resíduos, ao controle da poluição e à reciclagem de matérias) de saúde pública, pois quebra o ciclo evolutivo de várias doenças eliminando os vetores, além de criar oportunidades de empregos (GRS-UFPE, 2014).

A rapidez em que ocorre o processo de decomposição orgânica se dá de acordo com o material. Materiais ricos em carbonos degradam mais lentamente que os resíduos úmidos domésticos, nesses casos surge a necessidade de compensar a alta concentração de carbono com nitrogênio para que o processo avance. O processo contrário também pode ocorrer, como no caso da degradação de resíduos ricos em proteínas que possuem grande concentração de nitrogênio, como o processo de decomposição orgânica ocorre na presença de oxigênio (O₂)

atmosférico acontece a formação de gás carbônico e amônia que acaba sendo liberada para a atmosfera. Dessa forma o controle adequado da relação carbono: nitrogênio se faz necessário para o bom andamento do processo (REIS, 2005).

3.3.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA

O processo de digestão anaeróbica é mediado por bactérias na ausência de oxigênio no qual o microrganismo consome a biomassa e libera o biogás, composto principalmente de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) que pode ser queimado para produção de energia. Para a produção de biogás a partir desse processo fatores como a matéria-prima, potencial de hidrogênio, temperatura, umidade e a relação do carbono com nitrogênio na matéria-prima são de grande importância (VERGARA; TCHOBANOGLIOUS, 2012)

Este tratamento é uma maneira eficiente de cuidar de uma quantidade considerável de resíduos, reduzindo o seu poder poluente, sendo um tratamento biológico que tem sido apresentado como alternativa para tratar da fração putrescível de alguns componentes dos resíduos. A utilização do material orgânico pelas bactérias ocorre por mecanismos distintos que podemos chamar de anabolismo, em que as bactérias heterotróficas utilizam da matéria orgânica como fonte para síntese de material celular acarretando o aumento da massa bacteriana, e catabolismo no qual a fração orgânica é utilizada como fonte de energia por meio da conversão de produtos estáveis, liberando energia que é utilizada em parte pelas bactérias no processo de anabolismo. Dessa forma pode-se resumir o processo em dois estágios básicos em que no primeiro os orgânicos complexos são convertidos em outros compostos mais simples e no segundo ocorre a conversão dos ácidos orgânicos gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasoso como o metano (DE BARCELOS, 2009).

3.3.3 INCINERAÇÃO

A queima controlada de resíduos sob altas temperaturas é chamada de incineração, feita para realizar a combustão completa dos detritos de maneira que todo carbono presente no resíduo seja transformado em dióxido de carbono (CO_2), todo hidrogênio em água e todo, enxofre em dióxido (SO_2). Dentre os subprodutos desse processo estão inclusos cinzas e gases emitidos para a atmosfera, calor e energia. Embora calor e energia possam apresentar benefícios sociais e ambientais, dependendo do tipo de energia sendo deslocada, os gases emitidos para a atmosfera são poluentes e representam um problema. Incineradores modernos possuem um sistema de controle que diminuem a emissão de poluentes para níveis aceitáveis, equipamentos

e métodos de controle como Ciclones, Precipitadores eletrostáticos e filtros removem partículas dos gases; depuradores removem gases ácidos; redução catalítica e controle de temperatura minimizam a emissão de NO_x; e carvão ativado removem dioxinas, furanos e metais pesados do gás de combustão (VERGARA; TCHOBANOGLIOUS, 2012).

O método normalmente aplicado para o tratamento de RSU via incineração é o do ciclo combinado, no qual se tem a geração de energia elétrica e calor juntamente com a eliminação dos resíduos. A capacidade de geração depende da eficiência da transformação do calor em energia elétrica e do poder calorífico do material incinerado dessa forma esse método é aconselhável para o tratamento térmico de grandes quantidades de resíduos sólidos (mais de 160.000 t/ano ou 240 t/dia), sempre trabalhando com linhas medias de produção de 18 t/h (GRS-UFPE, 2014).

3.3.4 RECICLAGEM

Reciclagem é o reprocessamento de materiais descartados em novos produtos. Os benefícios ambientais da reciclagem derivam das economias tanto em recursos naturais virgens como em energia (CHRISTENSEN *et al.*, 2009). A prática de reciclagem, além de preservar o meio ambiente através da valorização dos resíduos, minimização da utilização de fontes naturais e utilização mais racional dos recursos naturais, também gera riqueza através da geração de emprego e renda, tornando-se um componente importante do processo de logística reversa. Por outro lado a coleta seletiva pode ser pouco eficiente; os materiais recicláveis podem ser contaminados, diminuindo seu valor comercial de venda; nem sempre os materiais reciclados são mais baratos do que retirar a matéria prima da natureza; pode ocorrer uma baixa demanda para compra de recicláveis; e pode haver a ausência de infraestrutura e incentivos públicos (NASCIMENTO *et al.*, 2015).

3.4 Processos Termoquímicos

Os processos de conversão termoquímicos incluem inúmeras possibilidades de produção de combustíveis e produtos químicos a partir de matérias primas bio-renováveis. Essas matérias primas podem ser usadas como combustíveis sólidos ou convertidas para líquidos ou gases que podem produzir energia elétrica, calor, produtos químicos, ou combustíveis líquidos e gasosos. Os processos de conversão termoquímica incluem três subcategorias: pirólise, gaseificação e combustão, dessa forma uma grande variedade de recursos pode ser usada para a produção de diferentes resultados. As tecnologias para os

processos de conversão termoquímica começaram a ser estudados a partir do século 17 registrando sua primeira patente em 1788, por Robert Gardner por seu trabalho na área da gaseificação. Entretanto, durante os anos 1800-1970 essa tecnologia foi esquecida devido a abundância do petróleo, quando foi retomada as pesquisas se focaram em fontes contrárias a madeira e carvão. As tecnologias de conversão termoquímica incluem, mas não se limitam, os processos de gaseificação, combustão direta, pirólise, liquefação e extração de fluido supercrítico. As conversões termoquímicas são caracterizadas por altas temperaturas e taxas de conversão elevadas. Esse tipo de conversão inclui uma gama de processos que vão desde a decomposição térmica em ambiente essencialmente não reativo, comumente chamado de pirólise, a decomposição em ambiente reativo, usualmente chamado de gaseificação quando os produtos são primariamente gases combustíveis. A pirólise pode ser considerada uma gaseificação incompleta em que a mistura de gases, líquidos e sólidos produzidos podem, separadamente, ter algum uso imediato para sustentar o processo. As características de cada um destes processos também podem variar em função do meio oxidante ou redutor, temperatura e pressão do processo (DEMIRBAS, 2009).

Dentre as 3 subcategorias do processo de conversão termoquímica a gaseificação oferece uma considerável recuperação energética e redução na emissão de potenciais poluentes. As principais dificuldades da gaseificação de resíduos sólidos urbanos, estão relacionadas à heterogeneidade dos resíduos. No entanto, a gaseificação é particularmente adequada para muitos resíduos agrícolas e industriais homogêneos, tais como resíduos de pneus, resíduos de papel e cartão, resíduos de madeira, resíduos alimentares, entre outros (BEGUM; RASUL; AKBAR, 2012).

3.4.1 GASEIFICAÇÃO

A gaseificação pode ser definida como o processo de conversão termoquímica de um material sólido ou líquido (que contém carbono na sua composição) em um combustível gasoso, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas (de 800 a 1.100°C) e em pressões atmosféricas ou maiores (até 33 bar). Utiliza-se um agente de gaseificação que pode ser ar, vapor de água, oxigênio ou uma mistura destes, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). A gaseificação também pode ser entendida como um processo termoquímico localizado em uma região entre a combustão e a pirólise (WARNECKE, 2000). Neste sentido, este processo é percebido como o tratamento termoquímico que, diferentemente da combustão, não permite a oxidação completa do carbono e do hidrogênio presentes no combustível em CO₂ e H₂O, respectivamente, dando origem a

compostos combustíveis, tais como CO, H₂ e CH₄. Além dos gases mencionados anteriormente, o gás produzido também inclui produtos típicos de combustão: CO₂, H₂O, O₂ (em quantidades mínimas) e N₂ (quando o agente gaseificador é ar), assim como teores menores de hidrocarbonetos, tais como o eteno (C₂H₄), o etano (C₂H₆), entre outros (SILVA *et al.*, 2012).

Em geral, o processo de gaseificação para a extração de energia a partir de fonte de carbono sólido envolve a secagem e três reações simultâneas ou concorrentes: combustão, pirólise e gaseificação. A combustão parcial de combustível sólido cria uma condição de alta temperatura sem oxigênio dentro do reator que promove a reação de pirólise, quebrando o combustível em produtos uma mistura de carbonos e voláteis contendo hidrocarbonetos de cadeia pequena e longa. A introdução de um agente gaseificador, como o vapor, atua como um impulsionador na reação de deslocamento do equilíbrio químico da água, transformando as fontes de carbono em uma mistura de produtos químicos de alto valor como, alcatrão, gases combustíveis e resíduos particulados. Esses produtos passam por uma série de etapas operacionais para separar e purificar os valiosos componentes gasosos, que são então direcionados para diversas aplicações. Essa abordagem de autossuprimento térmico confere uma viabilidade econômica ao processo de gaseificação, estabelecendo-o como uma técnica eficaz para a recuperação de energia a partir de resíduos plásticos (KANNAN; SHOAIIBI; SRINIVASAKANNAN, 2012).

3.4.1.1 Gaseificação de Resíduos Plásticos.

Os plásticos comportam-se de forma diferente de outros combustíveis sólidos, tais como carvão, papel ou biomassa quando submetidos ao processo de gaseificação. Eles se diferem no sentido de que não há char (resíduo sólido de carbono) ou teor de carbono fixo. Por outro lado, amostras, tais como papel ou biomassa têm em média 18% de carbono fixo e algumas cinzas, dependendo da taxa de aquecimento da amostra. A ausência de carbonos fixos no plástico faz uma diferença significativa para o processo de gaseificação, uma vez que não há teor de carvão (char) em plásticos, agentes gaseificante não têm a chance de reagir com a fase sólida da amostra a baixas temperaturas resultando na não obtenção do gás de síntese, a menos que a temperatura do reator seja alta o suficiente para acelerar a reação do agente gaseificante com a amostra a uma taxa comparável às taxas de reação de pirólise. A temperatura à qual o agente gaseificante se torna eficaz não é um valor fixo e depende do tipo de agente gaseificante em si, por exemplo, o ar como um agente gaseificador é esperado que mostre reatividade considerável a temperatura mais baixa do que vapor ou dióxido de carbono (AHMED; GUPTA, 2009).

As tecnologias de gaseificação de plástico são essencialmente aquelas já desenvolvidos para a gaseificação de outras matérias-primas, como a biomassa e carvão. Contudo, as características específicas dos resíduos de plásticos, em especial a baixa condutividade térmica, comportamento pegajoso, alta volátil conteúdo e notável formação de alcatrão, dificultar o seu tratamento em tecnologias de gaseificação e envolvem um sério desafio para a implementação do processo. Assim, um projeto de gaseificador adequado para a manipulação de plástico tem de combinar as seguintes características: i) ser capaz de fornecer altas taxas de transferência de calor, a fim de promover uma rápida despolimerização de resíduos plásticos, ii) evitar problemas operacionais relacionados com a natureza pegajosa dos plásticos, garantindo um bom controle das condições de funcionamento, iii) distribuição adequada do tempo de residência para favorecer o craqueamento do alcatrão e iv) permitir a utilização de catalisador primário *in situ*, proporcionando um bom contato com este catalisador (LOPEZ *et al.*, 2018).

As características complexas dos resíduos de plásticos limitam a utilização de algumas das tecnologias mais comuns usadas no processo da gaseificação de biomassa. Assim, o teor de carbono fixo baixo ou mesmo nulo dificulta a gaseificação de plásticos em gaseificadores de corrente ascendente e descendente. Da mesma forma, a natureza pegajosa dos polímeros e as dificuldades para o seu aquecimento também dificultam a utilização de fornos rotativos. Os leitos fluidizados têm características adequadas para evitar essas desvantagens e, portanto, têm sido amplamente utilizados na gaseificação de resíduos plásticos (ARENA *et al.*, 2011; KIM *et al.*, 2011; MASTELLONE; ZACCARIELLO; PINTO *et al.*, 2002).

Tradicionalmente, dois tipos de leitos fluidizados têm sido usados em processos de gaseificação sendo eles os leitos fluidizados borbulhantes e leitos fluidizados circulantes. Apesar das características interessantes dos leitos circulantes para os processos de gaseificação, especialmente o fato de permitirem a obtenção de alta conversão e baixos rendimentos de alcatrão, estudos de gaseificação plástica têm sido realizados exclusivamente em reatores borbulhantes (LOPEZ *et al.*, 2018).

Independentemente do tipo de reator, os principais parâmetros operacionais que desempenham um papel vital no processo de gaseificação são a relação de equivalência (ER), temperatura do reator, meio de gaseificação e tempo de residência. Para obter uma melhor confiabilidade do sistema, as variáveis operacionais devem ser otimizadas e controladas com precisão significativa. A técnica mais barata e eficaz para compreender qualitativamente o efeito de cada variável operacional e para identificar possíveis condições ótimas é através de simulação de processo (AL AMOODI *et al.*, 2013).

A simulação de processos industriais é uma ferramenta vital para o desenvolvimento, otimização e análise de sistemas complexos, como a gaseificação de resíduos sólidos. O Aspen Plus, que é amplamente utilizado tanto na indústria quanto em pesquisas acadêmicas, é um dos softwares disponíveis para esse propósito (CARVALHO *et al.*, 2020). Ele é um programa de simulação que permite modelar e prever o comportamento de processos químicos. O Aspen Plus fornece resultados valiosos sobre variáveis operacionais como relação de equivalência, temperatura do reator e tempo de residência. O impacto de cada parâmetro pode ser entendido qualitativamente usando a simulação do Aspen Plus. Além disso, é possível realizar análises de sensibilidade para determinar as condições ótimas de operação. O Aspen Plus se tornou uma ferramenta poderosa para engenheiros e pesquisadores que buscam avanços na sustentabilidade industrial, redução de custos e eficiência energética graças à sua interface simples e capacidade de modelagem detalhada (ASPEN TECHNOLOGY, 2000).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho utiliza simulação computacional para a obtenção de seus resultados. O dispositivo utilizado foi um notebook da marca Samsung, com configuração de processamento igual a 2,10 GHz em um processador Intel Core i3-10, memória RAM de 4Gb e HD de 1TB

O Aspen Plus é um software bem desenvolvido, em que seu sistema é baseado em “blocos” relacionados a operações unitárias, bem como reatores químicos, através dos quais se torna possível simular a maioria das operações industriais, além de possuir um extenso banco de dados para uma ampla variedade de compostos químicos, bem como uma seleção de modelos termodinâmicos necessários para a simulação precisa de qualquer sistema. Devido a sua ampla capacidade e resultados precisos na modelagem de processos, o Aspen Plus foi usado neste estudo para desenvolver e simular um processo de gaseificação de poliestireno.

Para uso do Aspen Plus, foram realizados os seguintes passos sequenciais para a simulação do modelo do processo de gaseificação.

- (1) especificação dos componentes do sistema e identificação dos componentes não convencionais;
- (2) seleção do modelo termodinâmico para cálculo das propriedades dos componentes presentes no processo;
- (3) definição do fluxograma do processo, usando blocos de operação da unidade e conectando as correntes;
- (4) especificação dos fluxos de alimentação tais como vazão, composição e condição termodinâmicas;
- (5) especificação dos blocos de operação da unidade tais como condição termodinâmica, reações químicas, etc.;
- (6) início da simulação;
- (7) Casos de estudo e análise

4.1 Considerações

Para alcançar os objetivos estipulados é necessário que algumas considerações sejam feitas. Dessa forma as mesmas estão listadas a seguir:

- (1) Todas as reações químicas foram consideradas como tendo atingido o equilíbrio dentro do gaseificador;
- (2) A queda de pressão no gaseificador é desprezada;
- (3) Modelo de regime permanente;

- (4) Pirólise é modelada como a decomposição do poliestireno em O₂, H₂, C e cinzas;
- (5) Não é considerada a presença de alcatrão;
- (6) Cinzas são inertes e não participam das reações;
- (7) Somente metano, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxigênio, nitrogênio e água foram considerados presentes na corrente de produto;

4.2 Componentes da Simulação

Os componentes foram inseridos com base em outros estudos de processos a serem modelado. Com base na revisão bibliográfica do processo de gaseificação estabeleceu-se três tipos de componentes listados a seguir:

- Componentes convencionais: elementos das reações em equilíbrio que estão presentes no banco de dados do Aspen Plus;
- Componentes não-convencionais: sólidos não convencionais que precisam da análise imediata e elementar para que suas propriedades físicas, químicas sejam calculadas. Onde os resíduos plásticos as cinzas se enquadram;
- Sólidos: são materiais puros, podem se apresentar como uma fase em uma mistura ou no equilíbrio químico. Como propriedades são caracterizados por sua pressão de vapor, peso molecular e propriedades críticas (ASPEN TECHNOLOGY, 2000).

A identificação (ID), tipo e os nomes dos componentes utilizados nessa simulação são exibidos na Tabela 1.

Tabela 1- Componentes presentes no processo estudado.

ID	TIPO	NOME
CH ₄	Convencional	Metano
H ₂	Convencional	Hidrogênio
CO	Convencional	Monóxido de Carbono
CO ₂	Convencional	Dióxido de Carbono
O ₂	Convencional	Oxigênio
N ₂	Convencional	Nitrogênio
H ₂ O	Convencional	Água
PS	Não-Convencional	Poliestireno
Cinzas	Não-Convencional	-
C	Sólido	Carbono-grafite

Fonte: Próprio autor (2023).

4.3 Métodos e Propriedades Físicas

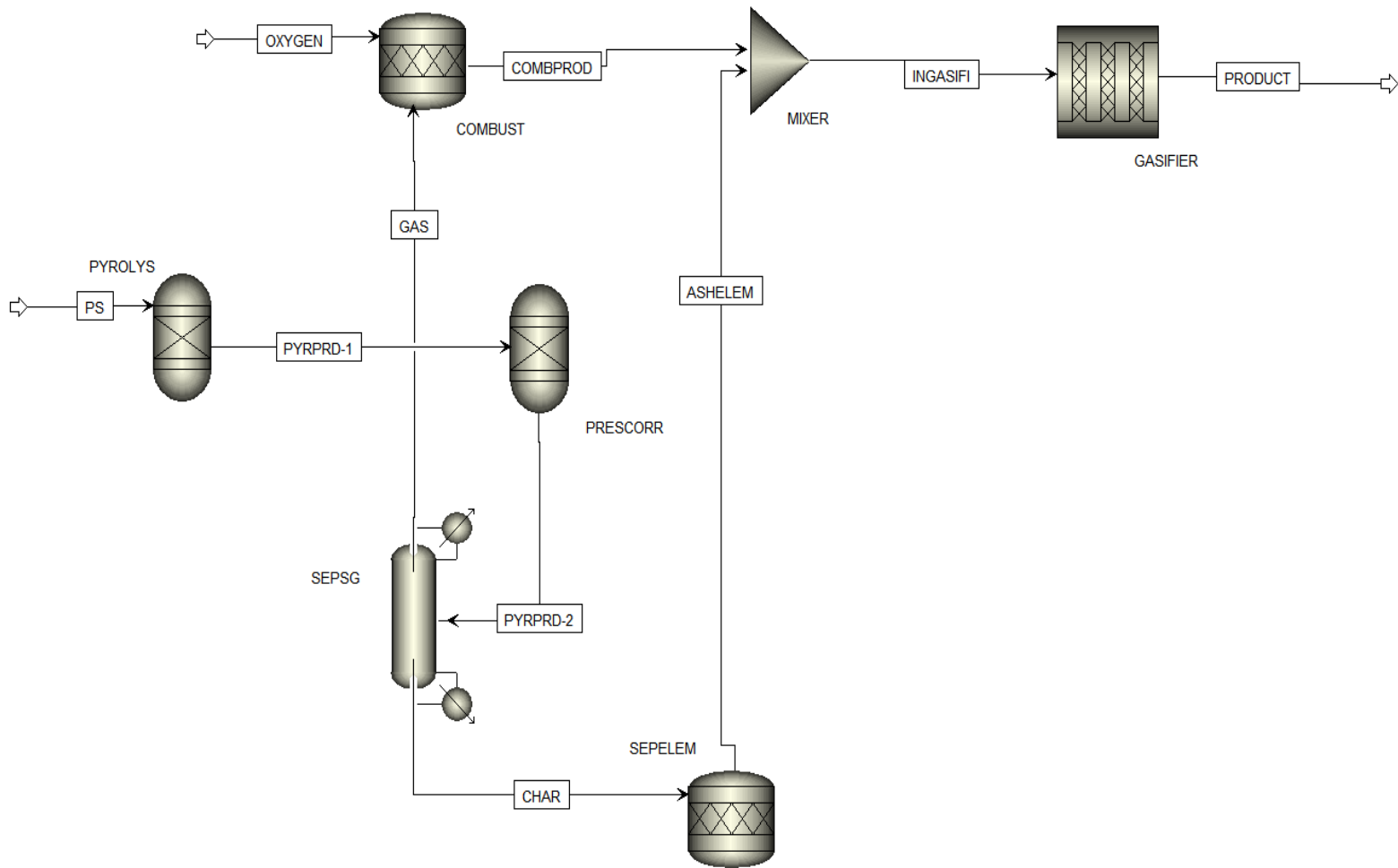
O método utilizado foi a equação de estado de Redlich-Kwong-Soave-Boston-Mathias que no simulador corresponde à opção RKS-BM. Esse modelo é indicado para estudos que envolvem o processamento de hidrocarbonetos, como processamento de gás, refinaria e gaseificação. Seus resultados são análogos com os da equação de estado de Peng-Robinson-Boston-Mathias, base para o método PR-BM (ASPEN TECHNOLOGY, 2000).

Como as cinzas e o resíduo de poliestireno (PS) não estão presentes na biblioteca interna do Aspen Plus, ou seja, são definidos como sólidos não-convencionais. Adotou-se o método HCOALGEN para cálculo da entalpia e do método DCOALIGT para cálculo da densidade, pois ambos empregam para seus cálculos as análises imediatas e elementar.

4.4 Descrição do Modelo

Um certo número de etapas foi definido para que a explicação fosse facilitada, mas na realidade, as etapas ocorrem dentro do mesmo equipamento; o reator de gaseificação. Dessa forma, definiu-se o processo global da gaseificação como decomposição, representando o processo de pirólise, combustão e gaseificação. O fluxograma do processo é mostrado na Figura 4, o qual foi realizado com base em uma simulação padrão que o software disponibiliza, porém que usa carvão (COAL) como matéria prima. Os blocos (equipamentos) utilizados neste processo estão relacionados na Tabela 2.

Figura 4-Fluxograma do Processo.



Fonte: Adaptado de ASPEN TECHNOLOGY, 2014.

Tabela 2-Blocos utilizados no processo de gaseificação.

NOME Aspen Plus	Bloco ID	Descrição
RYield	PYROLYS	Simula a pirólise do poliestireno a 1 atm.
RYield	PRESCORR	Realiza a correção da pressão para cada produto.
Sep2	SEPSG	Separa o gás dos resíduos sólidos (char).
RStoic	COMBUST	Modela a combustão dos voláteis.
RStoic	SEPELEM	Decompõe o char em C, H ₂ , O ₂ , N ₂ , e cinzas, a fim de lidar facilmente com as reações sólidas no bloco de gaseificação (GASIFIER).
Mixer	MIXER	Misturar a matéria-prima para o bloco GASIFIER.
RPlug	GASIFIER	Modela o processo de gaseificação dos componentes

Fonte: ASPEN TECHNOLOGY, 2014.

A alimentação é composta com 100% de PS. As características da alimentação foram obtidas a partir da literatura e são exibidas na Tabela 3.

Tabela 3- Características da alimentação.

Componente	Fonte	Análise Imediata (% Mássica em base seca)			Análise Elementar (% Mássica livre de cinzas)				
		Carbono Fixo	Voláteis	Cinzas	C	H	N	S	O
PS	ZHOU <i>et al.</i> , 2014	0,39	99,57	0,04	89,2	9	0	0	1,8

Os parâmetros de entrada e as condições operacionais correspondentes para a matéria-prima são especificadas na Tabela 4, condições brandas de temperatura e pressão, evitando assim um pré-processamento de condicionamento de matéria prima.

Tabela 4- Parâmetros de Operação do Modelo.

Parâmetro	Resíduos Plásticos	Ar	Reator de Pirólise	Gaseificador
Vazão mássica (g/s)	76,66	96,73 - 485,44	-	-
Pressão (atm)	1	1	1	1
Temperatura (°C)	25	25	500	Adiabático ou Isotérmico (600 – 1000)

4.4.1 SEQUÊNCIA DO MODELO

Os resíduos plásticos (PS) entram em no reator PYROL, modelado como um bloco RYIELD no Aspen Plus, o qual representa um reator de rendimento, que simula a decomposição nos componentes conforma a Equação 1, em uma temperatura de 500 °C e 1 atm, com base na composição da alimentação e as análises imediata e elemental mostradas na Tabela 3 utilizando os rendimentos mássicos descritos da Tabela 5, que foram adaptados utilizando o Excel, da simulação padrão disponibilizado pelo software que utiliza carvão (COAL) como alimentação.



Tabela 5 - Rendimento mássico no reator PYROL

Rendimento mássico da decomposição no reator PYROL				
Componente	C	H ₂	H ₂ O	O ₂
Rendimento (Fração)	0,9737	0,0084	0,0079	0,0099

No reator PRESCORR, ocorre um ajuste de pressão dos elementos resultantes da decomposição e uma separação entre a parte gasosa, que seguirá para o reator COMBUST, modelado como um bloco RStoic no Aspen Plus, em que irá ocorrer a adição de ar (composição mássica de 75,63% e 24,37% para o N₂ e o O₂ respectivamente) e o processo de combustão dos voláteis. A parte não gasosa que sai do reator PRESCORR na corrente CHAR, vai para o reator SEPELEM que irá decompor o char em C, H₂, O₂, N₂, e cinzas, a fim de facilitar as reações sólidas no bloco de gaseificação (GASIFIER).

O produto resultante do processo de combustão no reator COMBUST e o produto que sai do reator SEPELEM são misturados no MIXER que parte para o GASIFIER, modelado no Aspen Plus pelo bloco RPlug, em que irá realizar o processo de gaseificação dos componentes.

O bloco RPlug simula um reator tubular de 310 cm de comprimento com 150 cm de diâmetro e segue uma sequência de reações descritas na Tabela 6 na configuradas no tipo cinéticas (*Kinetic*) disponível no programa.

Tabela 6 - Reações de gaseificação que ocorrem no bloco RPlug (GASIFIER)

Reações no reator de gaseificação (GASIFIER)	
1	$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$
2	$C + 0,5 O_2 \leftrightarrow CO$
3	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$
4	$C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO$
5	$C + 2 H_2 \leftrightarrow CH_4$
7	$H_2 + 0,5 O_2 \leftrightarrow H_2O$
8	$CO + 0,5 O_2 \leftrightarrow CO_2$
9	$CH_4 + 2 O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O$
10	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
11	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3 H_2$

4.5 Análise de Sensibilidade

Utilizando a ferramenta de análise de sensibilidade do software Aspen Plus que permite a realização de várias simulações em faixas de valores pré-determinados para uma variável escolhida, foi realizado a avaliação da produção dos compostos de interesse na corrente do *Syngas* variando a temperatura da gaseificação (no componente GASIFIER) e a razão de equivalência, ER.

A análise foi dividida em partes, a primeira foi realizada uma simulação em que se avaliou a produção do gás de síntese variando os parâmetros de ER com o reator GASIFIER em regime adiabático; em seguida com uma mudança no regime do reator GASIFIER para isotérmico se fez as análises de ER e Temperatura que foram realizados variando um fator e fixando o outro, mantendo todos outros fatores que não fazem parte da análise fixados conforme os dados presentes na Tabela 4.

Portanto se fez 3 simulações em que se fixou a temperatura em 600,800 e 1000 °C no reator GASIFIER e se variou o ER da gaseificação para uma faixa de 13 valores entre os pontos 0,1 e 0,5 mais dois valores adicionais de ER igual a 1 e 1,1; da mesma maneira outras 3 simulações foram realizadas agora com a razão de equivalência fixada nos pontos de ER igual a 0,1 0,3 e 0,5, para uma faixa de temperatura variando em 13 pontos entre 600 e 1000 °C. Dessa forma torna-se possível avaliar a influência desses parâmetros no processo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinar as composições do *Syngas* obtidas no ao final do processo, inicialmente foram realizados cálculos para saber quanto de ar deveria entrar no sistema para a combustão completa dos resíduos plásticos. Estes cálculos foram realizados através da relação ER, que representa a entrada de ar no sistema levando em conta a quantidade de matéria prima utilizada na gaseificação:

$$ER = \frac{(\text{Massa de ar/Massa seca de resíduo plástico})_{\text{usado}}}{(\text{Massa de ar/Massa de resíduo plástico})_{\text{estequiométrico}}}$$

O denominador é calculado pela quantidade de ar necessária para realizar a combustão completa dos resíduos plásticos, dividida pela massa de resíduo que sofreria a combustão. Para a obtenção deste valor, faz-se necessário o balanceamento das reações seguintes.



Sendo assim, para uma vazão de alimentação de 76,66 g/s de resíduos plásticos, com composição 100 % de PS baseado em sua análise básica e elementar, a composição da alimentação é composta por 89,2 % de C, 9 % de H₂, 1,08 % de O₂. Utilizando a massa molar dos componentes envolvidos nas respectivas reações é possível saber a massa total de oxigênio requerida:

$$O_2 = (89,20 \% * 76,66 \text{ g}) * \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 182,34 \text{ g}$$

$$O_2 = (9,00 \% * 76,66 \text{ g}) * \frac{16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 55,19 \text{ g}$$

$$O_2 \text{ total} = 182,34 + 55,19 - 1,8 = 235,74 \text{ g}$$

Uma vez que o O₂ representa 24,37% do ar, chega-se à massa de ar necessária para a combustão completa dos resíduos plásticos:

$$\text{g de ar} = \frac{235,74 \text{ g}}{0,243} = 967,35 \text{ g de ar}$$

Considerando que os valores de ER já estão pré-definidos, a massa ar necessária para cada ER é obtida como mostrado na Tabela 7.

Tabela 7-Massa de ar no sistema de acordo com o valor de ER.

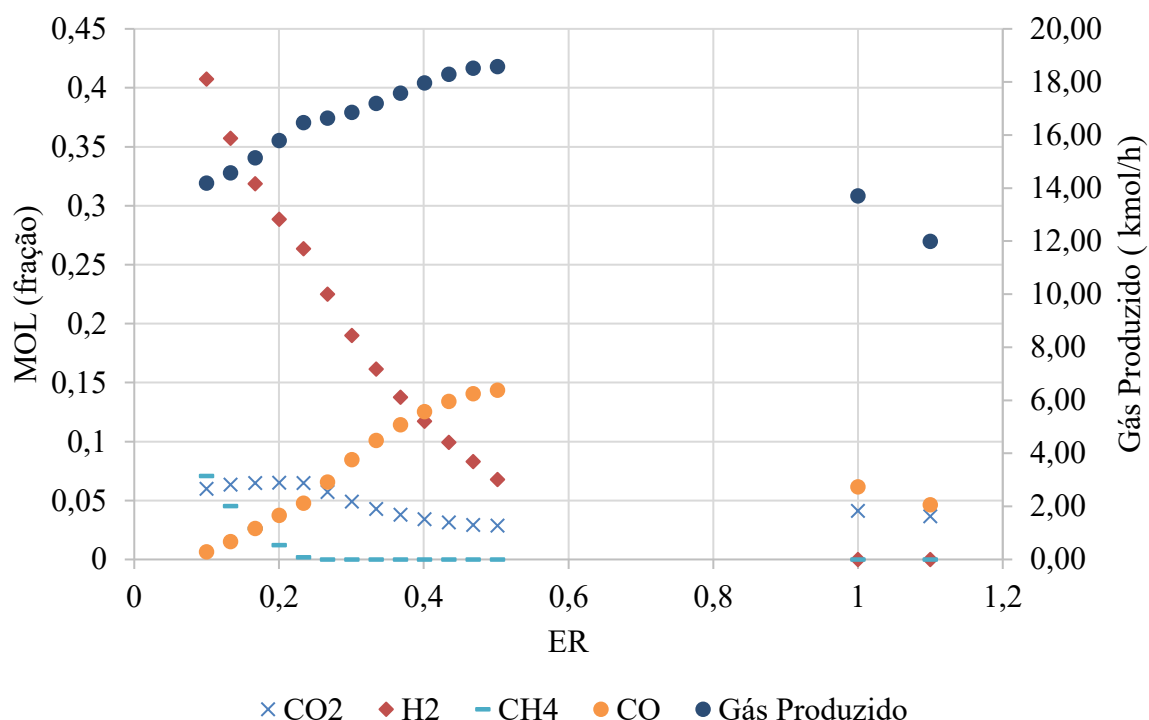
ER	Massa de ar alimentado (g)
0,100	96,73
0,133	128,65
0,167	161,55
0,200	193,79
0,233	226,20
0,267	258,60
0,300	291,01
0,333	323,42
0,366	355,82
0,400	388,23
0,433	420,63
0,466	453,04
0,500	485,45
1,000	967,35
1,100	1064,09

Fonte: Próprio autor (2023).

5.1 Influência da Razão de Equivalência

Para estudar a razão de equivalência na produção de *Syngas* foram realizados diferentes análises: 1) considerando um reator adiabático, onde a toda energia térmica gerada pelas reações é utilizada para a produção do gás de síntese, e; 2) onde a temperatura do reator foi fixada em 3 diferentes valores de 600 a 1000 °C, faixa em que tipicamente opera as gaseificações de Resíduos Sólidos Urbanos (BOSMANS; HELSEN, 2010). Dessa forma, iniciou-se a análise como processo adiabático variando o ER gerando a Figura 5.

Figura 5- Composição do gás produzido com reator adiabático.

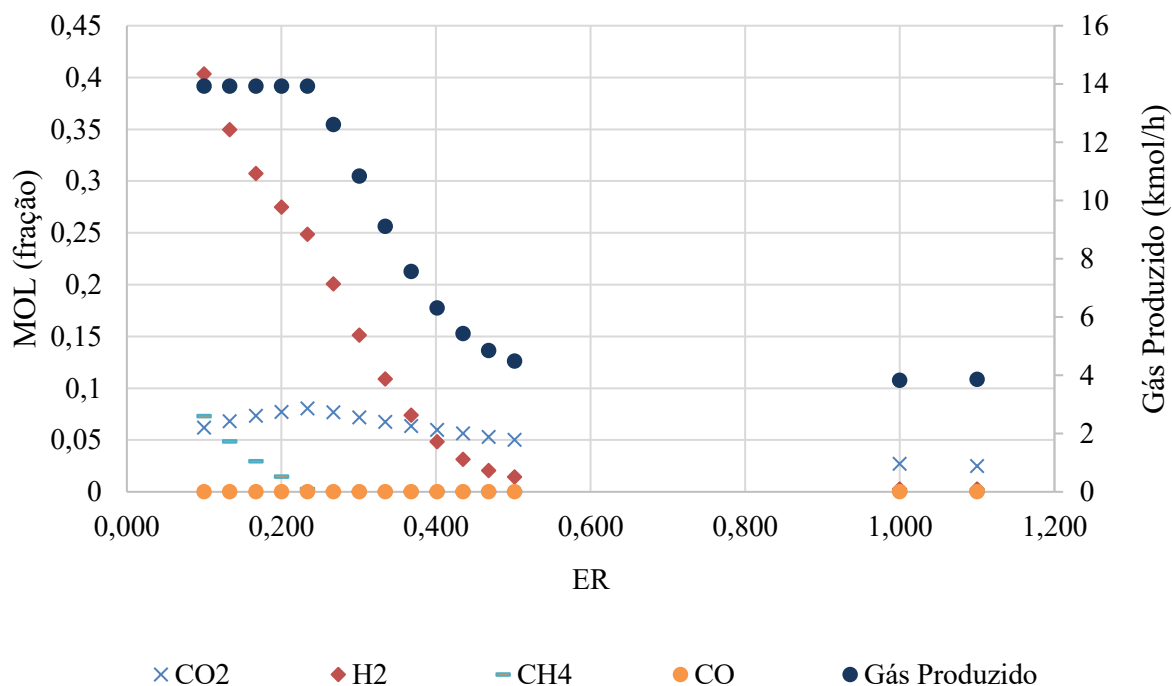


Fonte: Próprio autor (2023).

Analisando a Figura 5 pode-se observar que nas condições de um regime adiabático a produção de H₂ e CH₄ decai na medida que a razão de equivalência (ER) aumenta sendo que para o CH₄ a partir do ponto 0,2 sua produção se encerra, isso ocorre devido a maior presença de O₂ no sistema pois a reação do carbono com o oxigênio é priorizada; já para o H₂ sua produção sai de 40,74% a 6,8%, mudança que se dá devido ao aumento de nitrogênio na corrente de ar. enquanto que para o CO a produção aumenta junto com o ER chegando a 14,37% no ponto 0,5. Observa-se também um favorecimento na produção de CO em relação ao CO₂ a partir do ER 0,3 chegando um valor máximo de 14,37%, o que resulta na redução de CO₂ a partir desse ponto. Já o gás de síntese tem sua produção máxima no ER de 0,5 chegando a 18,6 kmol/h. No ponto de combustão completa (ER = 1) e de combustão com excesso de ar (ER = 1,1) nota-se a presença de apenas dois elementos, CO e CO₂ que se mantem em quantidades aproximadas, comportamento que se dá pois nestas condições a combustão é completa.

Para a segundo modelo de simulação, o regime adiabático não é mais considerado e a temperatura de 600°C é fixada, dessa forma observou-se um comportamento diferente à primeira simulação, como mostrado na Figura 6.

Figura 6- Composição do gás produzido à 600°C.

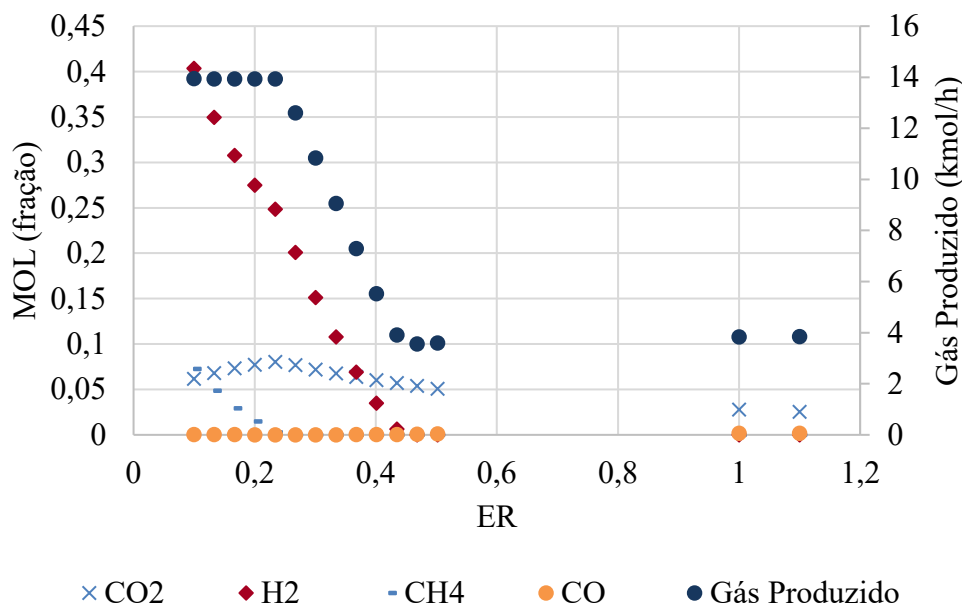


Fonte: Próprio autor (2023).

Analisando a Figura 6, nota-se que o H₂ reduz a produção significativamente à medida que a razão de equivalência aumenta saindo de 40,3% e chegando a 1% no ER de 0,5 e cessando a partir do ponto do ER igual 1, comportamento semelhante ao apresentado no regime adiabático, isso ocorre devido ao aumento da presença de O₂ de forma que no ponto de ER=1 e ER=1,1 o único componente é o CO₂. Entretanto para o CO e CO₂ o comportamento se diferenciou completamente do apresentado na Figura 5, não havendo produção de CO e CO₂ tendo sua produção praticamente linear variando, na faixa do ER 0,1 a 0,5, tendo sua produção máxima no ER de 0,23 com 8%. Como nessa situação a maior porção do *Syngas* (na faixa de ER 0,1 a 0,33) é formada pelo H₂, ele também sofre uma redução grande acompanhando o comportamento desse gás, tendo o seu maior valor de produção em 13,92 kmol/h para o fator de ar 0,1 representando 54% do gás produzido.

Para a terceira simulação, à temperatura de 800°C, observou-se um comportamento bem semelhante à segunda simulação como mostrado na Figura 7.

Figura 7- Composição do gás produzido à 800 °C.

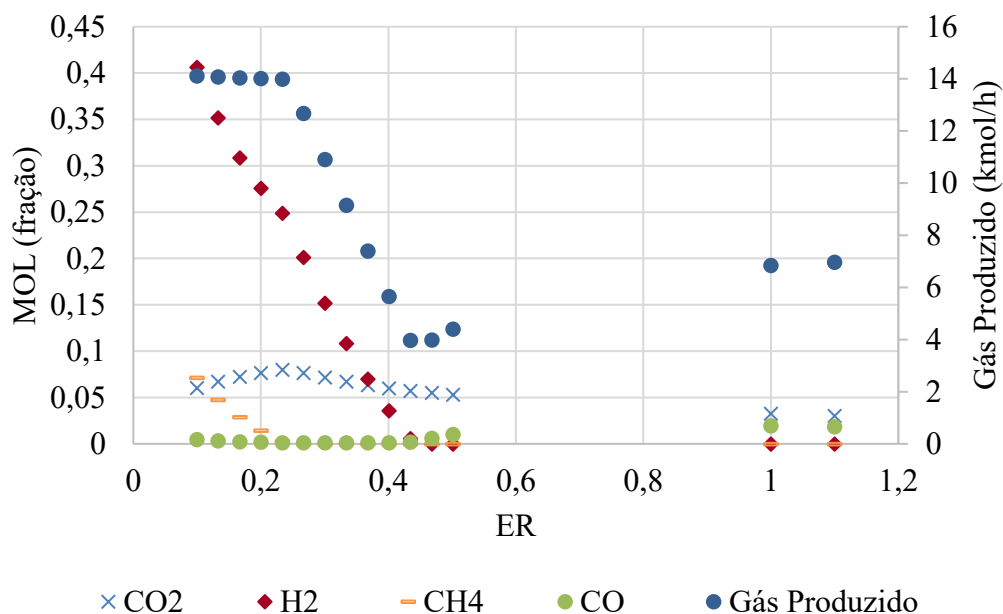


Fonte: Próprio autor (2023).

Através da análise da Figura 7, observa-se que a razão de equivalência promove o mesmo comportamento como visto na simulação à 600°C. Inclusive, nota-se valores extremamente semelhantes para todos os componentes, o gás hidrogênio, em que a composição atingiu um valor máximo de 40,3% enquanto o dióxido de carbono se manteve na faixa quase linear com produção máxima de 8% para o fator de ar 0,23. Para uma razão de equivalência de 0,1 o *Syngas* atingiu o valor máximo de 13,94 kmol/h. A produção de metano acaba na composição de *Syngas* para valores de ER superiores a 0,2.

Para a simulação seguinte, na temperatura de 1000°C, observou-se novamente um comportamento bem semelhante as demais simulações, conforme observado na Figura 8.

Figura 8- Composição do gás produzido à 1000 °C.

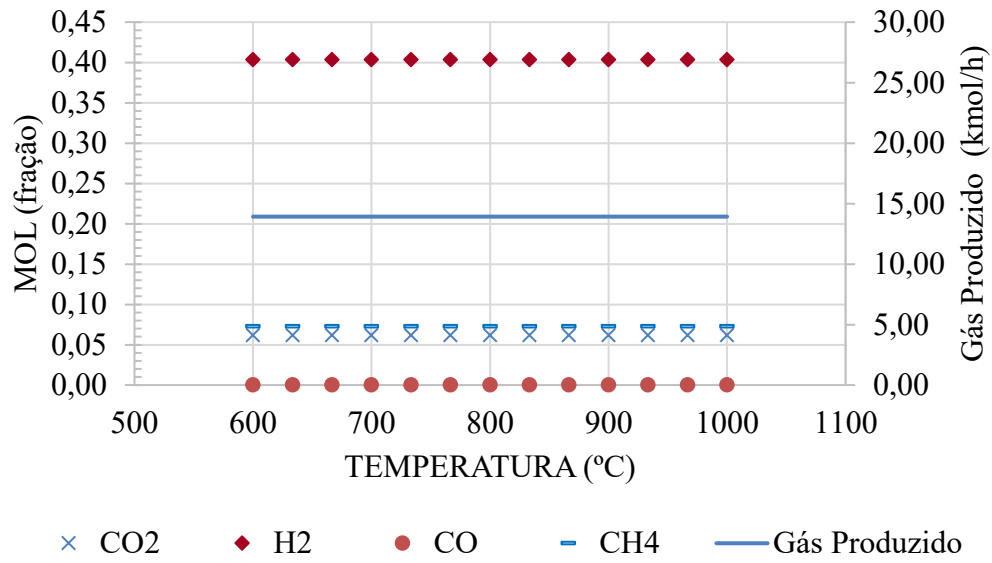


Fonte: Próprio autor (2023).

Para a temperatura de 1000 °C o comportamento geral permaneceu igual ao que já estava acontecendo para as outras temperaturas, o que indica que o fator que mais influência na produção do *Syngas* é o ER, e não a temperatura, situação que será analisada a seguir. Os pontos que mais se diferenciaram foram os pontos finais em que a razão de equivalência é igual a 1 e 1,1, nesses pontos a produção do gás de síntese aumentou em relação aos pontos de ER 0,5, isso ocorreu devido a pequena produção de CO que ocorreu nessa temperatura, situação que não aconteceu nesses pontos para as temperaturas de 600 e 800.

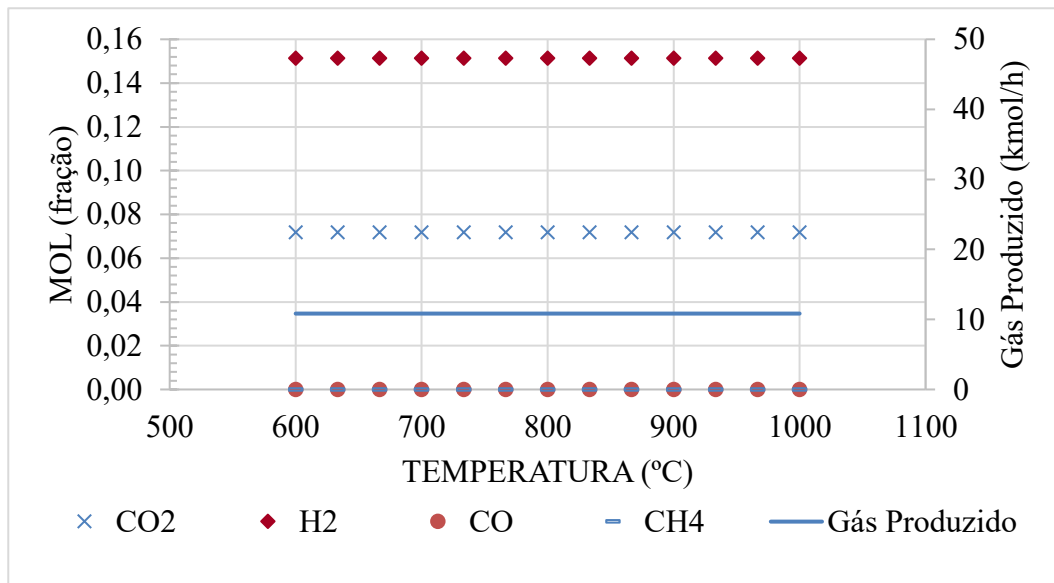
Em seguida foi realizada a análise da influência da temperatura no processo, fixado o valor da Razão de equivalência em três pontos, 0,1;0,3;0,5 e a temperatura foi variando dentro da faixa de 600 a 1000 °C dessa forma foram obtidas as Figura 9 Figura 10 Figura 11.

Figura 9- Composição do gás produzido com ER 0,1.



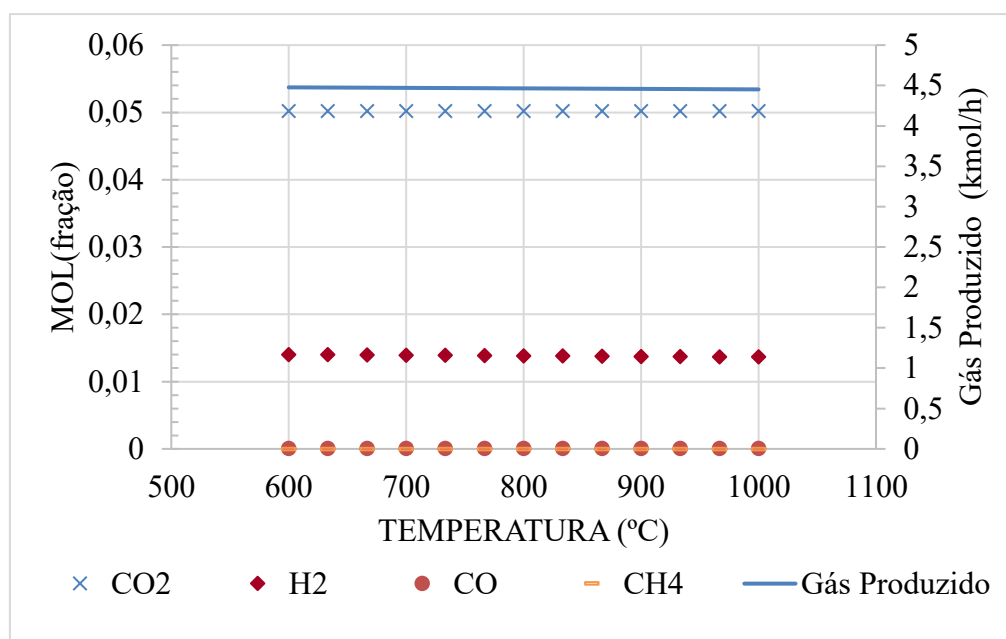
Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 10- Composição do gás produzido com ER 0,3.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 11- Composição do gás produzido com ER 0,5.



Fonte: Próprio autor (2023).

Como já vinha se observando nas figuras em que a temperatura estava fixa pôde ser constatado ao se variar a temperatura, a sua influência na composição do *Syngas* é nula de maneira que para todos as figuras com ER fixo e temperatura variando apresentam um comportamento linear, sendo assim a melhor condição de operação para esse sistema é com a gaseificação acontecendo de maneira adiabática como mostrado na Figura 5 que apresenta uma melhor curva de produção do gás de síntese além de uma composição mais variadas dos elementos. Dessa forma a melhor condição de operação seria com um ER de 0,4 num regime adiabático pois nesse ponto, apesar de não ser o pico da produção de *Syngas* tem-se uma boa mistura de CO e H₂ que são os componentes mais desejados no gás de síntese (PAIVA *et al.*, 2021).

5.2 Eficiência do Processo

Considerando os resultados da análise de sensibilidade o modelo de gaseificação em estado adiabático foi o que obteve melhores resultados, em que a temperatura de entrada da corrente no reator era de 500 °C e a de saída com 1232,49 °C para um ER de 0,4, pontos considerados ótimos para o processo. Dessa forma fez-se a avaliação da eficiência da gaseificação (GE) e o rendimento da gaseificação (GY). Como a matéria prima alimentada apresentava apenas uma quantidade de cinzas residual, pois a mesma é advinda de análise feita em resíduos sólidos urbanos, e quase a totalidade de sua composição são de voláteis a conversão

de carbono (fração de carbono presente na alimentação convertida em gás de síntese) é 100% em nenhum momento em que variou-se o ER o produto apresentou cinzas.

Fez-se o cálculo do rendimento da Gaseificação (GY) utilizando o balanço de nitrogênio conforme a Equação 3 em que Q_{air} é o volume de ar alimentado, M_{pw} é a vazão mássica de poliestireno alimentado no processo. O GY expressa o quão bem a matéria prima foi convertida em produto.

$$GY = \frac{Q_{air} \cdot 0,7563}{M_{pw} \cdot \%N_2} \quad (4)$$

Para o cálculo da eficiência da gaseificação (GE) utilizou-se a Equação 4 também chamada de eficiência de gás frio que consiste entre a razão da energia química do gás de síntese produzido pela energia química da alimentação. Sendo o Q_{Syngas} a vazão volumétrica em m^3 do *Syngas*. O GE expressa a quantidade de energia útil produzida em relação a quantidade de energia consumida o que indica o quão bem a energia disponível para a produção do *Syngas* foi utilizada.

$$GE = \frac{Q_{Syngas} \cdot PCI_{Syngas}}{M_{pw} \cdot PCI_{pw}} \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (5)$$

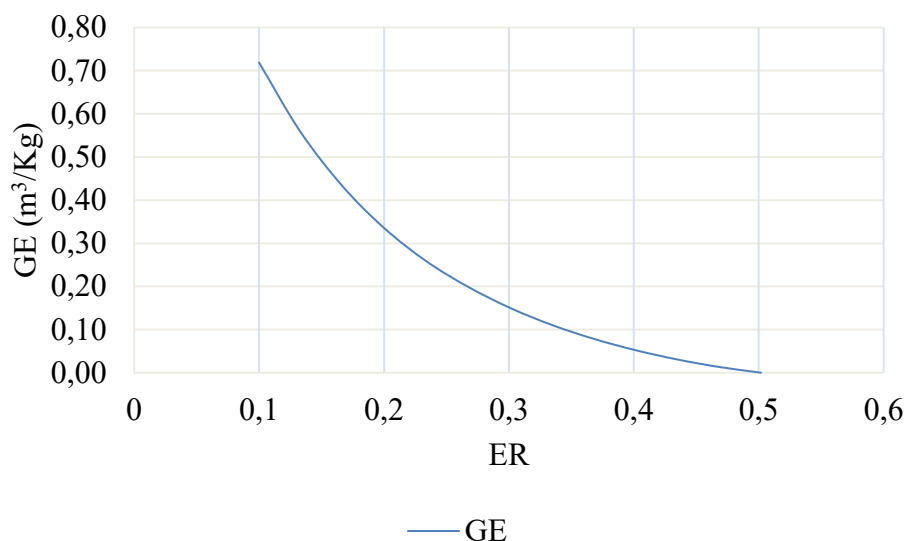
O valor do Poder calorífico inferior do poliestireno (PCI_{pw}) utilizado foi de 41,5 MJ/kg (THEMELIS; MUSSCHE, 2014) e para o cálculo do Poder calorífico inferior do *Syngas* (PCI_{Syngas}) foi calculado utilizando as Equações 5 e 6 abaixo que utiliza a porcentagem dos elementos presentes no gás (%C; %H;%O;%S) e o teor de umidade (%U) (FIGUEROA, 2021).

$$PCS = (33900 \times \%C) + \left(141800 \left(\%H - (\%O/8) \right) \right) + (9200 \times \%S) \quad (6)$$

$$PCI = PCS - (2440 \times ((9 \times \%H) + \%U)) \quad (7)$$

A Figura 12 mostra como ocorreu a variação da eficiência (GE) nos diferentes pontos da relação de equivalência (ER).

Figura 12- Influencia da razão de equivalência na eficiência do processo.



Fonte: Próprio autor (2023).

Como pode ser observado a eficiência do processo temo seu valor máximo de 72% e vai decaindo na medida que se aumenta a razão de equivalência isso ocorre devido à baixa produção de hidrogênio nesses pontos, gerando um baixo poder calorífico, somado a esse fator a produção de CO₂ de maneira geral também contribui para uma redução nos valores do PCI, visto que sua produção significa que parte do CO está sendo oxidado liberando energia que poderia ser usada na queima posterior do gás de síntese, assim como a sua presença dilui a concentração de CO e H₂, componentes com maior poder calorífico.

Para a análise do rendimento faz-se necessário compará-lo com outros estudos dessa forma a Tabela 8 nos mostra os dados de rendimento assim como outros fatores importantes para comparação.

Tabela 8 - Comparação do rendimento com outros estudos de gaseificação de materiais plásticos.

Tipo de reator	Alimentação	Material do leito	Condições operacionais	GY (m ³ /kg)	Composição do gás de síntese	PCI MJ/m ³	Fontes
Leito fluidizado borbulhante (100 kg/h)	PE	Olivina	ER: 0,2 – 0,29 T (°C): 807 – 850	4,2 – 6,2	H ₂ : 30,1 – 29,1 CO:18,4 – 20,9 CO ₂ :1,6 – 1,2 CH ₄ :3,4 – 1,5	7,6 – 6,3	(ARENA <i>et al.</i> , 2011)
Leito fluidizado (1 kg/h)	PP	70% areia – 30% dolomita	ER: 0,32 – 0,36 T (°C): 850	5,3	H ₂ : 6 CO:7 CO ₂ :16 CH ₄ :8	7,4	(TOLEDO; AZNAR; SANCHO, 2011)
Leito de grelhas moveis com O ₂ puro (80 kg/h)	Mistura de resíduos plásticos	Não se aplica	ER: 0,15 – 0,6 T (°C): 700 – 900	1,2 – 1,5	H ₂ : 41 – 29 CO:22 – 33 CO ₂ :8,2 – 22 CH ₄ :4,3 – 10	9 – 11,8	(LEE <i>et al.</i> , 2013)
Reator de equilíbrio	55% PP – 45% PEAD	Não se aplica	ER: 0,1 – 0,5 T (°C): 600 – 1000	3 – 7,6	H ₂ : 15 – 53 CO:5 – 27 CO ₂ :0 – 10 CH ₄ :0 – 7	2,8 – 7,5	(LIMA, 2018)
Reator tubular	PS	Não se aplica	ER: 0,1 – 0,5 Adiabático.	1,2 – 2,1	H ₂ : 7 – 41 CO:1 – 14 CO ₂ :3 – 6 CH ₄ :0 - 7	0,01 – 25,8	(Próprio autor, 2023)

Com base nos dados observados na Tabela 8 podemos observar que os valores do rendimento (GY) são próximos dos valores encontrados em outros trabalhos estando inclusive na mesma faixa do trabalho realizado por Lee *et al*, 2013, mesmo que as situações de operação tenham sido diferentes. Nota-se que no presente trabalho foi possível obter um *Syngas* com produção máxima de H₂ e CO em uma faixa semelhante a outros trabalhos 41% e 14% respectivamente. O poder calorífico inferior apresentou em seu ponto mínimo um valor muito baixo enquanto que em seu máximo superou os apresentados em outros trabalhos.

6. CONCLUSÃO

O processo de gaseificação dos resíduos plásticos de PS foi modelado com sucesso usando ferramentas do pacote de simulação Aspen Plus, com destaque para os seguintes aspectos:

Observação do comportamento em diferentes situações operacionais: O estudo permitiu analisar o processo de gaseificação sob diferentes condições, incluindo a razão de equivalência, a temperatura da gaseificação e o regime de operação (adiabático ou isotérmico).

Vantagens do regime adiabático: Foi constatado que a operação em regime adiabático resultou em um aumento na produção do gás de síntese em comparação com o regime isotérmico. Além disso, o aumento da razão de equivalência (ER) nesse regime levou a uma maior produção de gás de síntese, com um rendimento de até 72% para ER na faixa de 0,1 a 0,15, refletindo um alto teor de H_2 nesses pontos (entre 41% e 32%).

Limitações do regime isotérmico: No regime isotérmico, mesmo com variações de temperatura, não houve influência significativa na produção de syngas. Além disso, os pontos de ER mais altos (como 0,5) apresentaram uma produção de gás de síntese acima dos 1000 °C, mas com baixos níveis de H_2 e CO, resultando em um valor extremamente baixo para o Poder Calorífico Inferior (PCI) e um rendimento de 0%.

Comparação com outros estudos: Os resultados obtidos neste trabalho mostraram-se próximos aos de outros trabalhos, apesar das diferenças nos produtos e regimes utilizados. Isso ressalta a relevância dos dados apresentados e indica que podem contribuir para estudos mais aprofundados sobre o processo de gaseificação de resíduos plásticos, constituindo uma alternativa sustentável de destinação.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. Perfil 2019 - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Abiplast**, p. 45, 2019. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-2017.pdf>
- ABNT. **Norma Brasileira ABNT NBR 10004**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.1215/15476715-1540160>
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos no Brasil 2020. **Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE**, p. 51, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>
- ABRELPE. Panorama 2021. p. 3–4, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.30875/9789287053916-002.zhtml>
- AHMED, I. I.; GUPTA, A. K. Hydrogen production from polystyrene pyrolysis and gasification: Characteristics and kinetics. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 15, p. 6253–6264, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2009.05.046>. Acesso em: 15 abr. 2019.
- AL AMOODI, N.; KANNAN, P.; AL SHOAIBI, A.; SRINIVASAKANNAN, C. Aspen Plus Simulation of Polyethylene Gasification Under Equilibrium Conditions. **Chemical Engineering Communications**, v. 200, n. 7, p. 977–992, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.715108>
- ARENA, U.; DI GREGORIO, F.; AMORESE, C.; MASTELLONE, M. L. A techno-economic comparison of fluidized bed gasification of two mixed plastic wastes. **Waste Management**, v. 31, n. 7, p. 1494–1504, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.02.004>
- ASPEN TECHNOLOGY. Aspen Plus: Model for Entrained Flow Coal Gasifier Aspen Plus. **Aspen Technology, Inc**, p. 1–33, 2014. Disponível em: <http://www.aspentech.com>
- ASPEN TECHNOLOGY, I. Aspen Plus ® User Guide. **Aspen Technology, Inc.**, p. 936, 2000.
- BARBOSA, V. **Poluição sem fronteiras — Brasil é o 4º país que mais gera lixo plástico**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/brasil/poluicao-sem-fronteiras-brasil-e-o-4o-pais-que-mais-gera-lixo-plastico/>. Acesso em: 12 set. 2019.
- BEGUM, S.; RASUL, M. G.; AKBAR, D. An Investigation on Thermo Chemical Conversions of Solid Waste for Energy Recovery. **World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Environmental and Ecological Engineering**, v. 62, n. 2, p. 624–630, 2012.
- BOSMANS, A.; HELSEN, L. Energy From Waste: Review of Thermochemical Technologies for Refuse Derived Fuel (RDF) Treatment. **Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste**, n. November 2010, p. 8–11, 2010.

- CARVALHO, C. V. de A.; PEREIRA, C. de S. S.; QUEIROZ, M. de C.; MENDONÇA, P. M. **E-book do Programa de Mestrado Profissional em Ciências Ambientais**. [S. l.]: Universidade de Vassouras, 2020.
- CHRISTENSEN, T. H.; GENTIL, E.; BOLDRIN, A.; LARSEN, A. W.; WEIDEMA, B. P.; HAUSCHILD, M. C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems. **Waste Management and Research**, v. 27, n. 8, p. 707–715, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X08096304>
- DE BARCELOS, B. R. **Avaliação De Diferentes Inóculos Na Digestão Anaeróbia Da Fração Orgânica De Resíduos Sólidos Domésticos**. Brasília: [s. n.], 2009.
- DEMIRBAS, A. Thermochemical Conversion Processes. In: **Biofuels**. london: springer, 2009. p. 261–304. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-84882-011-1_6
- FIGUEROA, J. E. J. **PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO TERMOQUÍMICA**. [S. l.: s. n.]
- GEWERT, B.; PLASSMANN, M. M.; MACLEOD, M. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. **Environmental Sciences: Processes and Impacts**, v. 17, n. 9, p. 1513–1521, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c5em00207a>
- GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: Impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciencia e Saude Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1503–1510, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000600014>
- GRS-UFPE. Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. p. 188, 2014. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_residuos_solidos_Relat_Final.pdf
- KANNAN, P.; SHOAIBI, A. Al; SRINIVASAKANNAN, C. Optimization of Waste Plastics Gasification Process Using Aspen-Plus. In: **Intech**. [S. l.: s. n.]. p. 13. *E-book*. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- KIM, J. W.; MUN, T. Y.; KIM, J. O.; KIM, J. S. Air gasification of mixed plastic wastes using a two-stage gasifier for the production of producer gas with low tar and a high caloric value. **Fuel**, v. 90, n. 6, p. 2266–2272, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.021>
- LANDIM, A. P. M.; BERNARDO, C. O.; MARTINS, I. B. A.; FRANCISCO, M. R.; SANTOS, M. B.; DE MELO, N. R. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polimeros**, v. 26, p. 82–92, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1897>

- LEE, J. W.; YU, T. U.; LEE, J. W.; MOON, J. H.; JEONG, H. J.; PARK, S. S.; YANG, W.; LEE, U. Do. Gasification of mixed plastic wastes in a moving-grate gasifier and application of the producer gas to a power generation engine. **Energy and Fuels**, v. 27, n. 4, p. 2092–2098, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef301758z>
- LIMA, M. C. Simulação do processo de gaseificação de resíduos plásticos visando a produção de gás de síntese utilizando o software aspen plus. p. 40, 2018.
- LOPEZ, G.; ARTETXE, M.; AMUTIO, M.; ALVAREZ, J.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. July 2017, p. 576–596, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>
- MASTELLONE, M. L.; ZACCARIELLO, L.; ARENA, U. Co-gasification of coal, plastic waste and wood in a bubbling fluidized bed reactor. **Fuel**, v. 89, n. 10, p. 2991–3000, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.019>
- MICHAELIS. **Michaelis Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/residuo>. Acesso em: 22 fev. 2021.
- MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F. de; BRITO, J. C. X. de; ALMEIDA, T. P. F. de; MANSUR, G. L. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. [S. l.: s. n.].
- MONTENEGRO, R. S. ; SERFATY, M. E. Aspectos gerais do poliestireno. [s. l.], ano 1, 2015, p. 1-.
- NASCIMENTO, V. F.; SOBRAL, A. C.; ANDRADE, P. R. de; OMETTO, J. P. H. B. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, n. 4, p. 445–458, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- PAIVA, M.; VIEIRA, A.; GOMES, H. T.; BRITO, P. Simulation of a downdraft gasifier for production of syngas from different biomass feedstocks. **ChemEngineering**, v. 5, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemengineering5020020>
- PINTO, F.; FRANCO, C.; ANDRÉ, R. N.; MIRANDA, M.; GULYURTLU, I.; CABRITA, I. Co-gasification study of biomass mixed with plastic wastes. **Fuel**, v. 81, n. 3, p. 291–297, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00164-8](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00164-8)
- PUC RIO. Gaseificação. **Puc Rio**, p. 68–78, 2005.
- REIS, M. F. P. Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos. **Tesis Doctoral**, p. 1–239, 2005.
- REZENDE, J. H.; MURGEL, M. A. de T.; CARBONI, M.; RUSSI, R. R.; CAPPS, A. L. de A. P.; TEIXEIRA, H. L.; SIMÕES, G. T. C.; LOURENÇO, B. L. R.; OLIVEIRA, C. de A.

Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú (SP). **Eng Sanit Ambient**, v. 8, n. 1, p. 1–8, 2013.

SILVA, E.; VIEIRA, R.; MARTINEZ, J.; HAIKAL, M.; ROCHA, M.; VILASBOAS, C. **Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. [S. l.: s. n.].

THEMELIS, N. J.; MUSSCHE, C. 2014 Energy and Economic Value of Municipal Solid Waste (MSW), Including Non-Recycled plastics (NRP), Currently Landfilled in the Fifty States. **Columbia University**, p. 40, 2014. Disponível em:

<http://www.americanchemistry.com/Policy/Energy/Energy-Recovery/2014-Update-of-Potential-for-Energy-Recovery-from-Municipal-Solid-Waste-and-Non-Recycled-Plastics.pdf>

TOLEDO, J. M.; AZNAR, M. P.; SANCHO, J. A. Catalytic Air Gasification of Plastic Waste (Polypropylene) in a Fluidized Bed. Part II: Effects of Some Operating Variables on the Quality of the Raw Gas Produced Using Olivine as the In-Bed Material. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 21, p. 11815–11821, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie200145p>

VAQUERIZO, L.; COCERO, M. J. CFD–Aspen Plus interconnection method. Improving thermodynamic modeling in computational fluid dynamic simulations. **Computers and Chemical Engineering**, v. 113, p. 152–161, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.03.019>

VERGARA, S. E.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Municipal solid waste and the environment: A global perspective**. [S. l.: s. n.]. v. 37 Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-050511-122532>

WARNECKE, R. Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier. **Biomass and Bioenergy**, v. 18, n. 6, p. 489–497, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00009-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00009-X)

WILK, V.; HOFBAUER, H. Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier. **Fuel**, v. 107, p. 787–799, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.068>

ZHOU, H.; MENG, A.; LONG, Y.; LI, Q.; ZHANG, Y. Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 64, n. 5, p. 597–616, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.873094>