

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

José Luiz Nunes Poyares Junior



**Avaliação do potencial de implementação de uma planta
piloto de pirólise na Escola de Química da UFRJ
utilizando como matéria-prima resíduos plásticos
coletados pelo ReciclaCT**

RIO DE JANEIRO

Julho de 2023

José Luiz Nunes Poyares Junior

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA PILOTO DE
PIRÓLISE NA ESCOLA DE QUÍMICA DA UFRJ UTILIZANDO COMO MATÉRIA-
PRIMA RESÍDUOS PLÁSTICOS COLETADOS PELO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.
André Ferreira Young, D.Sc.
Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

Rio de Janeiro
Julho de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

P83a Poyares, Jose
Avaliação do potencial de implementação de uma planta piloto de pirólise na Escola de Química da UFRJ utilizando como matéria-prima resíduos plásticos coletados pelo ReciclaCT / Jose Poyares. - Rio de Janeiro, 2023.
53 f.

Orientadora: Raquel Massad Cavalcante.
Coorientador: Andre Ferreira Young.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. Pirólise. 2. Plástico. I. Massad Cavalcante, Raquel, orient. II. Ferreira Young, Andre, coorient. III. Título.

José Luiz Nunes Poyares Junior

Avaliação do potencial de implementação de uma planta piloto de pirólise na Escola de Química da UFRJ utilizando como matéria-prima resíduos plásticos coletados pelo ReciclaCT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado em 21 de julho de 2023.

Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.

André Ferreira Young, D.Sc.

Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

Fabiana Valéria da Fonseca, D.Sc.

Jose Carlos Costa da Silva Pinto, D.Sc.

Rio de Janeiro
Julho de 2023

AGRADECIMENTOS

A Deus e a todas as forças que me garantem o privilégio de poder viver.

Aos meus pais, Maria de Fátima e José Luiz, por me proporcionarem amor desde 1996, e que estão sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida. Eu os amo muito!

À minha irmã Maria Luiza e aos meus avós, Lola, Manoel, José e Maria, que foram meus suportes e garantia de conforto ao longe da minha jornada.

Ao meu companheiro de vida Luiz Fillipe, por toda a paciência, amor e carinho. Sem ele eu não teria chegado ao fim deste trabalho.

Aos meus amigos da Escola de Química-UFRJ, em especial Karine, Camila, Beatriz, Hashi, Amanda, Paulo, Gustavo, Adryena e Marcella, por todo incentivo e momentos de descontração. Vocês são incríveis!

Ao projeto ReciclaCT, representado pela Marlene Caldas, por todo o suporte e disponibilização das informações necessárias.

À professora Raquel Massad, por seu suporte ao longo de toda a minha graduação e pela orientação no trabalho.

Aos professores André e Flavio, por seu auxílio e paciência na orientação do trabalho.

À Escola de Química-UFRJ, por toda a jornada de graduação!

*“It’s just a spark
But it’s enough to keep me going
And when it’s dark out
No one’s around, it keeps glowing
Every night I try my best to dream
Tomorrow makes it better
(...)
Gotta let it happen”*

Last Hope - Paramore

RESUMO

POYARES JUNIOR, Jose. **Avaliação do potencial de implementação de uma planta piloto de pirólise na Escola de Química da UFRJ utilizando como matéria-prima resíduos plásticos coletados pelo ReciclaCT**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023).

Com o aumento da utilização de plástico, há um grande risco ambiental que envolve a má utilização e descarte dos resíduos gerados por este produto. Desta forma, faz-se necessária a criação de novas tecnologias a fim de minimizar o descarte do plástico no meio ambiente de uma forma geral. Visando a transformação do plástico em novos produtos de valor agregado considerável, existe o processo de pirólise: este processo baseia-se na despolimerização dos plásticos, na ausência de oxigênio, a fim de gerar diversos tipos de compostos. Os compostos gerados podem ser subdivididos em três categorias principais: sólidos, gasoso e líquidos. O presente trabalho tem como objetivo esquematizar de forma simplificada o processo de pirólise utilizando o plástico coletado pelo projeto ReciclaCT-UFRJ e analisar os requisitos necessários para implementar uma planta em escala piloto na Escola de Química-UFRJ. Primeiramente, é necessário um pré-tratamento do plástico para que ele obtenha um diâmetro de aproximadamente 1 mm; para isto, utiliza-se um triturador juntamente de uma peneira. Após o pré-tratamento, a carga é levada ao reator através de um alimentador que seja capaz de evitar a entrada de oxigênio no sistema reacional. A priorização do processo apresentado é a formação do produto líquido – óleo pirolítico. Para esta finalidade, obteve-se uma temperatura ótima para o processo de 700 °C com um tempo de residência de 2 segundos. O reator deve ser do tipo fluidizado com catalisadores. Após a reação ocorrer, o gás pirolítico é levado a um ciclone para que as partículas sólidas sejam removidas da corrente. Em seguida, o gás segue para um condensador onde o óleo pirolítico é condensado. Por fim, obteve-se uma estimativa de preço para os equipamentos, bem como para o gás inertizante do sistema e a energia elétrica a ser utilizada.

ABSTRACT

POYARES JUNIOR, Jose. **Avaliação do potencial de implementação de uma planta piloto de pirólise na Escola de Química da UFRJ utilizando como matéria-prima resíduos plásticos coletados pelo ReciclaCT**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023).

With the increasing use of plastic, there is a great environmental risk that involves the misuse and disposal of waste generated by this product. In this way, it is necessary to create new technologies to minimize the disposal of plastic in the environment in general. Aiming at transforming plastic into new products with considerable added value, there is the pyrolysis process: this process is based on the depolymerization of plastics, in the absence of oxygen, to generate different types of compounds. The compounds generated can be subdivided into three main categories: solids, gases and liquids. The present work aims to outline in a simplified way the pyrolysis process using the plastic collected by the ReciclaCT-UFRJ project and to analyze the necessary requirements to implement a pilot scale plant at the Escola de Química-UFRJ. Firstly, it is necessary to pre-treat the plastic so that it produces a diameter of approximately 1 mm; for this, use a crusher together with a sieve. After pre-treatment, the load is taken to the reactor through a feeder that can prevent the entry of oxygen into the reaction system. The prioritization of the presented process is the formation of the liquid product – pyrolytic oil. For this direction, an optimal temperature for the process of 700 °C was obtained with a residence time of 2 seconds. The reactor must be of the fluidized type with catalysts. After the reaction takes place, the pyrolytic gas is taken to a cyclone so that solid particles are removed from the stream. Then the gas goes to a condenser where the pyrolytic oil is condensed. Finally, a price estimate was obtained for the equipment, as well as for the inert gas in the system and the electricity to be used.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO.....	3
1.2 METODOLOGIA	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. PROJETO RECICLACT.....	4
2.1 RESULTADOS OBTIDOS PELO RECICLACT	5
3. SELEÇÃO DO PLÁSTICO	9
3.1 TIPOS DE PRODUTO EM FUNÇÃO DO TIPO DE CARGA	9
3.2 FORMAÇÃO DO GÁS DE PIRÓLISE POR TIPO DE CARGA	10
3.3 COMPOSIÇÃO DOS GASES	11
3.4 ENERGIA TOTAL DOS GASES	13
3.5 DENSIDADE DOS GASES.....	14
4. PROCESSO E EQUIPAMENTOS	15
4.1 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	15
4.1.1 SELEÇÃO DO PLÁSTICO	16
4.1.2 RESTRIÇÕES	17
4.1.3 TRITURADOR	18
4.1.4 PENEIRA.....	20
4.2 PROCESSAMENTO.....	22
4.2.1 ALIMENTADOR.....	23
4.2.2 REATOR.....	25
4.3 TEMPERATURA	28
4.4 CATALISADOR.....	30
4.2.4 INERTIZAÇÃO E FLUIDIZAÇÃO	32
4.2.6 CICLONE	34
4.2.7 CONDENSADOR.....	36
4.3 PRODUTOS.....	38
4.3.1 PRODUTOS SÓLIDOS	39
4.3.2 PRODUTOS GASOSOS	40
4.3.3 PRODUTOS LÍQUIDOS	42
4.4 PÓS-TRATAMENTO.....	43
4.4.1 DESTILAÇÃO.....	43
4.4.2 PURIFICAÇÃO	44

4.4.3 REJEITOS E RESÍDUOS	45
5. PERSPECTIVAS SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO NA ESCOLA DE QUÍMICA DA UFRJ	46
6. CONCLUSÃO	48
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
7.1 DIMENSIONAMENTO DO REATOR	49
7.2 MODELAGEM DO PROCESSO	49
7.3 AVALIAR O CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO NECESSÁRIOS PARA O PROCESSO	49
7.4 ANÁLISE LABORATORIAL DA CARGA UTILIZADA	49
7.5 ANÁLISE LABORATORIAL DO PRODUTO	50
7.6 AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE	50
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1: Quantidade de gás obtida por tipo de plástico pirolisado	11
Figura 2: Energia contida em cada tipo gás produzido	13
Figura 3: Densidade dos gases	14
Figura 4: Triturador LXT-180®	19
Figura 5: Triturador TLP2520®	19
Figura 6: Triturador ZL-PC180®	20
Figura 7: Peneira CasaLab	21
Figura 8: Peneira Bertel	22
Figura 9: Diagrama de blocos simplificado do processo de pirólise e obtenção dos produtos	23
Figura 10: Alimentador tipo parafuso ZHONGDE®	24
Figura 11: Alimentador tipo parafuso ZHENGZHOU®	24
Figura 12: Representação de reator de leito fixo	26
Figura 13: Representação de reator de leito fluidizado	27
Figura 14: Zeólitas ZMS-5	31
Figura 15: Cloreto de níquel	31
Figura 16: Ciclone HMC-24	35
Figura 17: Ciclone AW-C3201	35
Figura 18: Ciclone JBXF1.1-00	36
Figura 19: Trocador de calor Qingli	37
Figura 20: Trocador de calor QXC160S16A	38
Figura 21: Composição de produtos sólidos na pirólise de determinados plásticos	40
Figura 22: Composição de produtos gasosos na pirólise de determinados plásticos	41

ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS

TABELA

Tabela 1: Quantidade coletada de resíduos por ano.....	6
Tabela 2: Quantidade coletada por tipo de plástico	7
Tabela 3: Média da quantidade coletada e proporção por tipo de plástico	7
Tabela 4: Proporção dos componentes dos gases de pirólise.....	12
Tabela 5: Comparação entre gases fluidizantes	33
Tabela 6: Propriedades físico-químicas dos plásticos.....	38
Tabela 7: Características físico-química do diesel convencional e de outros óleos provenientes de pirólise.....	42
Tabela 8: Volume mensal recebido pelo ReciclaCT.....	46
Tabela 9: Seleção dos equipamentos para a planta piloto	47

QUADROS

Quadro 1: Categorias e subcategorias dos resíduos coletados	5
Quadro 2: Compostos formados da pirólise de acordo com a carga utilizada	9
Quadro 3: Comparação Leito fixo x Leito fluidizado	27

1. INTRODUÇÃO

Por conta das diversas possibilidades de aplicação, o plástico apresenta-se como um material versátil e amplamente empregado em todo o mundo. Mesmo com a sua produção em larga escala tendo se iniciado apenas por volta de 1950, a quantidade produzida e utilizada mundialmente já se mostra insustentável, de modo que se faz urgente evitar o aumento dos resíduos oriundos deste tipo de material (GEYER *et al.*, 2017). Desde o início da produção de plástico, mais de 8 gigatoneladas foram geradas e, apenas na última década, 300 mil toneladas foram despejadas nos oceanos. A decomposição do plástico através de foto-oxidação, transformação mecânica e ação de bactérias, acarreta a diminuição física do plástico, gerando microplásticos capazes de contaminar seres vivos e intoxicar toda uma cadeia alimentar (SO, 2022). Apenas considerando o ano de 2016, 11% de todo o plástico produzido foi despejado na natureza. Isto equivale a uma quantidade entre 19 e 23 milhões de toneladas. Diversos acordos e compromissos políticos ao redor do mundo preveem uma diminuição de até 70% nas emissões anuais deste tipo de resíduo, como por exemplo o acordo de Paris em 2015 e o acordo assinado pela ONU em 2022. Todavia para que isto ocorra, novas tecnologias de reciclagem e reutilização do plástico devem ser implementadas (BORRELLE, 2020).

Nos últimos 45 anos, a proporção de plástico nos resíduos sólidos gerais em países de alta renda cresceu de 1% para 10%. Isto se dá, principalmente, por conta da ampliação da utilização deste tipo de material para embalagens dos mais variados tipos e finalidades. Através de uma observação da composição dos plásticos, pode-se constatar a presença de diversos monômeros como etileno, propileno, entre outros. Estes tipos de monômeros de hidrocarbonetos são de fonte fóssil, o que pode dificultar ainda mais sua degradabilidade. Vale ressaltar que nenhum dos tipos mais utilizados de plástico é biodegradável, o que corrobora para a ocorrência de grandes acúmulos na natureza, impactando direta e indiretamente em toda a fauna e flora (GEYER *et al.*, 2017).

O Brasil encontra-se na quarta colocação entre os países que mais produzem plástico, ficando atrás apenas de países mais populosos: Estados Unidos, China e Índia. A quantidade total de plástico gerada mundialmente em 2019 foi de 11,3 milhões de toneladas, onde apenas 1,3% foram recicladas. Esta quantidade aumenta com o passar dos anos: no ano de 2020, o descarte passou para 13,3 milhões de toneladas (WWF Brasil, 2020). Para enfrentar isto, existem programas ambientais de fonte pública ou privada, como por exemplo o projeto Recicla CT, criado pela Decania do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro

em 2007. Este projeto visa a gestão de resíduos, realizando a coleta seletiva e encaminhando o material coletado para cooperativas de reciclagem (RECICLACT-UFRJ, 2021)

Visando a diversificação das formas de reciclagem, a indústria enfrenta dois grandes desafios. O primeiro está relacionado a disponibilização de materiais mais simples que já estão sendo reciclados, principalmente, via reciclagem mecânica com finalidade de obter novos produtos sem a necessidade de processos mais complexos. Isto leva ao segundo ponto que está relacionado às dificuldades de realização de outros tipos de reciclagem, pois outros processos de reciclagem necessitam de mais etapas e, conseqüentemente, mais recursos e mão-de-obra. Todavia, por conta de limitações tecnológicas, a reciclagem mecânica apenas de plásticos é insuficiente para atender às demandas do mercado atual, principalmente devido aos aumentos de geração de plástico conforme apresentado. Por conta disto, faz-se necessário outras formas de processamento para que se amplie a reutilização e se evite o desperdício de recursos. Dentre as outras opções de processamento, destaca-se a reciclagem química. Métodos de reciclagem química podem elevar substancialmente a taxa de reciclagem e ainda transformar o resíduo em produtos economicamente interessantes, agregando valor à cadeia produtiva (QURESHI *et al.*, 2020).

Na reciclagem química, o resíduo é exposto a elevadas temperaturas, podendo ou não ter presença de catalisadores, levando-o à degradação e, conseqüentemente, formação de petroquímicos, que por sua vez podem ser empregados para diversas finalidades. Este processo chama-se pirólise, e tem como principal característica a ausência de oxigênio no meio reacional a fim de se obter um maior rendimento e uma maior qualidade do produto, além de questões de segurança e ambientais. O material utilizado pode ser plástico ou de outra fonte (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2018).

A aplicação deste processo na Escola de Química-UFRJ tem como objetivo a geração de um produto com valor agregado a partir do resíduo coletado pelo ReciclaCT-UFJR. Além deste ponto, existem aplicações voltadas ao meio acadêmico, onde docentes e discentes podem visualizar na prática diversos fenômenos estudados ao longo dos cursos ministrados pela instituição.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o mapeamento de tecnologias de pirólise com o objetivo de implementação de uma planta piloto de pirólise de plásticos na Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Cidade Universitária - Ilha do Fundão). O processo de pirólise pode ser aplicado dentro da Escola de Química-UFRJ para fins acadêmicos de aprendizagem e demonstração prática. Além disto, os produtos formados podem ser utilizados em diversas disciplinas ministradas na instituição.

1.2 METODOLOGIA

Foram levadas em consideração todas as etapas do processo, desde a seleção do resíduo a ser utilizado até a separação e purificação dos produtos. Com as informações adquiridas, foi realizada uma proposta de processo e a estimativa inicial dos custos de instalação, de modo a fundamentar futuras propostas de financiamento junto às agências de fomento.

Assim, foram analisados diversos processos de pirólise, considerando tanto suas características em comum quando as diferenças entre cada um dos processos. Este estudo balizará o projeto de instalação de um reator pirolítico, tendo como matéria-prima principal o resíduo coletado em todo o Centro de Tecnologia do Campus da UFRJ (Ilha do Fundão) através do projeto ReciclaCT.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi construído em sete capítulos. No primeiro capítulo, encontra-se a introdução ao tema abordado. No segundo capítulo, o projeto ReciclaCT é apresentado, bem como, os resíduos coletados por tal projeto. No terceiro capítulo, é realizada a seleção dos plásticos que poderão ser utilizados no processo de pirólise proposto. O processo, juntamente com os devidos tipos de equipamentos, é apresentado no capítulo quatro. Para concluir o trabalho, é apresentado no capítulo cinco os resultados e a discussão, acerca dos equipamentos selecionados e, também, os valores envolvendo a planta piloto; por fim, a propriamente dita conclusão no capítulo seis. Por fim, no capítulo sete estão algumas sugestões para trabalhos futuros com o intuito de aprimorar o processo.

2. PROJETO RECICLACT

O projeto ReciclaCT foi idealizado para realizar a coleta seletiva, triagem e envio de resíduos recicláveis às cooperativas de resíduos sólidos. Sua operação se iniciou em 2007 e tem como idealizadora a Decania do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (ReciclaCT – UFRJ, 2022).

Suas ações estão em conformidade com o Decreto nº 5.940/2006 do presidente em exercício na época, Luiz Inácio Lula da Silva, criado para instruir o gerenciamento de resíduos sólidos em instituições e órgãos públicos, a fim de regulamentar a Política Nacional de Resíduos Sólidos. No ano de 2022, este Decreto foi revogado para a instituição do Decreto nº 10.936/2022, que em seu Artigo 8º, Parágrafo 1º diz o seguinte:

Art. 8º- A coleta seletiva será realizada em conformidade com as determinações dos titulares do serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, por meio da segregação prévia dos referidos resíduos, de acordo com sua constituição ou sua composição.

§ 1º O sistema de coleta seletiva, de acordo com as metas estabelecidas nos planos de resíduos sólidos:

I - Será implantado pelo titular do serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos;

II - Estabelecerá, no mínimo, a separação de resíduos secos e orgânicos, de forma segregada dos rejeitos; e

III - Será progressivamente estendido à separação dos resíduos secos em suas parcelas específicas.

Desta forma, os colaboradores do projeto realizam a separação dos resíduos recicláveis descartados por todo o Centro de Tecnologia (Cidade Universitário da UFRJ - Ilha do Fundão). Estes colaboradores também são responsáveis pela destinação destes resíduos, que atualmente são enviados a associações de catadores e cooperativas de reciclagem. As principais atividades envolvidas vão desde a coleta em si até a realização de visitas técnicas e participação em eventos sobre o tema. Além disto, é realizado um rigoroso controle de indicadores internos e um evento anual em homenagem ao Dia do Meio Ambiente (ReciclaCT – UFRJ, 2022).

2.1 RESULTADOS OBTIDOS PELO RECICLACT

O histórico de dados do projeto ReciclaCT data do ano de 2009 até o ano de 2021. Há uma separação principal dos resíduos coletados nas seguintes categorias: papel, plástico, metal, vidro, eletrônico, óleo vegetal e outros. Os resultados, tanto de coleta quanto de destinação dos resíduos, são variáveis ao longo dos anos, tendo em vista fatores socioeconômicos e naturais, a exemplo da Pandemia de COVID-19.

A iniciativa realizou treinamento dos colaboradores que constituem a mão-de-obra do projeto. Desde o ano de 2009, por volta de 800 funcionários foram treinados. Os treinamentos, majoritariamente, foram realizados entre os anos de 2009 e 2017. De acordo com os registros fornecidos, em 2009 186 pessoas foram treinadas em seis sessões diferentes. Este foi o ano com maior capacitação, seguido por 2013 com 114 membros treinados, e 2017 com 113. As sessões de treinamento envolvem todas as etapas, desde a coleta seletiva, a disponibilização e envio às cooperativas (ReciclaCT – UFRJ, 2022).

Em relação ao material reciclável coletado, estes podem ser classificados de acordo com o aspecto e origem de cada tipo de resíduo, conforme o Quadro 1.

Quadro 1: Categorias e subcategorias dos resíduos coletados

Categoria do material	Papel	Plástico	Metal	Vidro
Subcategorias de acordo com o ReciclaCT	Papelão capa	PSAI	Lata de alumínio	-
	Papelão misto	PET Branca	Sucata	-
	Papel cola	PET Colorida	Sucata de ferro	-
	Papel misto	PET óleo	-	-
	Papel branco	PP	-	-
	Jornal	PEAD Branco	-	-
	Revista	PEAD Colorido	-	-
	-	Plást. Filme Branco	-	-
	-	Plást. Filme Colorido	-	-
	-	PVC	-	-

Fonte: RECICLACT-UFRJ (2022)

De acordo com as subcategorias, não há subdivisão de vidros e os resíduos metálicos são separados em sucata geral, sucatas específicas de ferro e latas de alumínio, que em sua maioria são doadas a catadores locais. Já os papéis são subdivididos em papelão capa, provenientes de livros e cadernos; papelão misto, que é proveniente de caixas e outras embalagens; papel cola, que contém resquícios de aderentes; papel branco, que é o papel sulfite; papel misto, que é o

resíduo impossibilitado de ser segregado; jornal; e revistas. Os plásticos possuem a maior diversidade de tipos e são eles: PSAI (Poliestireno de Alto Impacto), PET (Politereftalato de etileno) branca, PET colorida, PET contaminada com óleo, PP (Polipropileno), PEAD (Poliestireno de alta densidade) branca, PEAD colorida, PVC (Policloreto de vinila) geral, Plástico filme (PVC) branco e Plástico filme (PVC) colorido (ReciclaCT – UFRJ, 2022).

Considerando as quatro principais categorias de materiais recicláveis (papel, plástico, metal e vidro), a quantidade coletada anualmente ao longo dos últimos doze anos (2010 a 2021) é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Quantidade coletada de resíduos por ano

Item\ano	Quantidade coletada por ano (kg)					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Vidro	2.993	2.190	2.921	3.132	2.121	2.080
Metal	8.090	14.093	15.553	18.121	9.789	10.860
Plástico	5.374	6.256	5.660	7.284	4.383	3.425
Papel	28.876	51.261	40.710	51.423	37.344	37.077
TOTAL	45.332	73.800	64.844	79.959	53.637	53.442
Item\ano	Quantidade coletada por ano (kg)					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Vidro	5.229	4.716	4.557	4.406	1.243	1.016
Metal	13.567	11.666	14.356	15.978	2.782	2.429
Plástico	4.058	4.838	4.455	5.170	956	1.200
Papel	41.949	39.850	45.049	36.344	6.736	2.579
TOTAL	64.803	61.068	68.417	61.897	11.717	7.223

Fonte: RECICLACT-UFRJ (2022)

Ao analisar-se os dados apresentados na Tabela 1, é possível observar a substancial diminuição de todas as categorias nos anos de 2020 e 2021. Isto ocorreu, principalmente, em decorrência da pandemia de COVID-19, que ocasionou a redução do consumo e, consequentemente, da geração de resíduos na UFRJ (Centro de Tecnologia). Até o ano de 2019, havia uma média de 62.720 kg de resíduos coletados; com o maior resultado sendo observado em 2013, com 79.959 kg, e o menor no ano inicial, com 45.332 kg.

Os resíduos plásticos, que serão o tema central deste trabalho, foram discriminados de acordo com a sua composição química: PSAI, PET, PP, PEAD e PVC (contém o plástico filme) conforme Tabela 2.

Tabela 2: Quantidade coletada por tipo de plástico

	Quantidade coletada (kg)					
Tipo de plástico	2010	2011	2012	2013	2014	2015
PSAI	436	488	148	122	150	42
PET	1775	2022	1707	2524	1430	1446
PP	1086	1441	1213	1961	999	784
PEAD	617	643	1178	988	765	392
PVC	1460	1663	1415	1689	1040	762
Total	5374	6256	5660	7284	4383	3425
	Quantidade coletada (kg)					
Tipo de plástico	2016	2017	2018	2019	2020	2021
PSAI	291	175	219	464	109	0
PET	1415	1839	1786	1614	293	113
PP	1014	1189	1123	1238	129	102
PEAD	391	471	344	796	229	577
PVC	949	1164	985	1058	197	409
Total	4058	4838	4455	5170	956	1200

Fonte: RECICLACT-UFRJ (2022)

Conforme abordado por Qureshi *et al.*, (2020), a composição do plástico adicionado ao reator de pirólise tem profundo impacto sobre o seu desempenho. Por conta disto é necessário avaliar a mistura de tipos de plástico que são coletados anualmente pelo projeto ReciclaCT. Tanto as médias considerando e desconsiderando os anos de 2020 e 2021, quanto as proporções de cada tipo de plástico em relação ao total anual, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Média da quantidade coletada e proporção por tipo de plástico

Tipo de plástico	Média (kg) (2010-2021)	Média (kg) (2010-2019)	Proporção média (2010-2021)	Proporção média (2012-2019)
PSAI	220	253	5%	5%
PET	1497	1756	34%	34%
PP	1023	1205	23%	24%
PEAD	616	658	14%	13%
PVC	1066	1218	24%	24%
Total	4421	5095	-	-

Fonte: RECICLACT-UFRJ (2022)

Conforme apresentado na Tabela 3, houve uma mudança considerável nas médias de coleta incluindo e excluindo os anos de 2020 e 2021. No entanto, as proporções mantiveram-se praticamente inalteradas. Não se observou tendências consideráveis de aumento ou queda das quantidades coletadas, embora em alguns anos haja um aumento ou queda considerável. Desta forma, os dados de 2010 a 2019 serão considerados para fins de estimativa.

Como pode-se observar, a proporção de PSAI foi a menor, enquanto o plástico presente em maior proporção foi o PET. O PEAD foi o segundo menos encontrado entre os resíduos coletados, enquanto PP e PVC possuem a mesma proporção no segundo lugar.

A composição do resíduo utilizado na pirólise está ligada diretamente à composição do produto e impacta nas etapas que deverão ser adicionadas ao processo. Além disto, a temperatura de pirólise é um fator de suma importância, que altera a composição do material final produzido (QURESHI *et al.*, 2020).

3. SELEÇÃO DO PLÁSTICO

3.1 TIPOS DE PRODUTO EM FUNÇÃO DO TIPO DE CARGA

Conforme visto no Capítulo 2, a coleta de resíduos realizada no Centro de Tecnologia da UFRJ resulta em uma mistura muito heterogênea de resíduos plásticos. Desta forma, a carga a ser utilizada no reator pode possuir qualidade diversa, caso esta não seja devidamente selecionada e preparada para tal processo.

Dentre os tipos de plástico encontrados pelo projeto ReciclaCT, cada um gera compostos específicos e demanda formas específicas de pré-tratamento. Os compostos formados dependem, especialmente, da carga empregada, da temperatura e pressão de pirólise utilizada, da umidade da carga, granulometria do material e da catálise utilizada. Estes compostos estão descritos no Quadro 2 de acordo com o tipo de plástico utilizado como matéria-prima e com a temperatura empregada. Além dos compostos abaixo, são formados outros com menor valor agregado que serão apresentados posteriormente.

Quadro 2: Compostos formados da pirólise de acordo com a carga utilizada

Tipo de plástico	Produtos da pirólise	
	Temperatura Baixa (< 400°C)	Temperatura Alta (> 700°C)
PSAI	Estireno e seus oligômeros	Estireno e seus oligômeros e hidrocarbonetos aromáticos
PET	Ácido ftálico	Benzeno, ácido benzoico, formaldeído, acetaldeído
PP	Cera e óleos	Gases e óleos leves
PEAD	Cera e parafina	Gases e óleos leves
PVC	Ácido clorídrico e benzeno	Tolueno e compostos clorados

Fonte: QURESHI *et al.* (2020)

Deve-se atentar para produção de compostos nocivos ao processo como é o caso da formação de ácido clorídrico (HCl) que pode causar corrosão do reator e da tubulação, bem como a formação de ácido ftálico que pode deteriorar a qualidade do óleo, além de causar entupimentos (KAMINSKY *et al.*, 2021). Assim, a utilização de certos tipos de plástico deve ser regulada com a presença de catalisadores e mantendo a temperatura elevada a fim de evitar a formação de produtos indesejados.

A presença do cloro na fórmula do PVC dificulta sua utilização na pirólise, tendo em vista as adversidades apresentadas. Há formas de remover o HCl presente no meio, no entanto estes processos envolvem a utilização de adsorventes de metais alcalinos (DOU *et al.*, 2012). Tendo em vista esta dificuldade, a presença do PVC na carga de alimentação torna-se dificultadora para o processo. Desta forma, sugere-se a separação deste tipo de material antes da entrada dos resíduos no reator pirolítico.

Outro material que pode dificultar o processamento pirolítico a baixas temperaturas é o PET, devido à possível formação de compostos, como o ácido benzoico, que tende a entupir encanamentos e dificultar no processo de troca térmica. Todavia, acima dos 400°C não se tem esta dificuldade tendo em vista que o composto formado – ácido benzoico – possui ponto de ebulição igual a 249 °C (Lumsden, 1905). Portanto, não há necessidade de excluir o PET do processo, tendo em vista que este é o tipo de plástico com maior quantidade na coleta e, sua remoção, limitaria a aplicação para a construção de uma planta piloto de pirólise de plásticos.

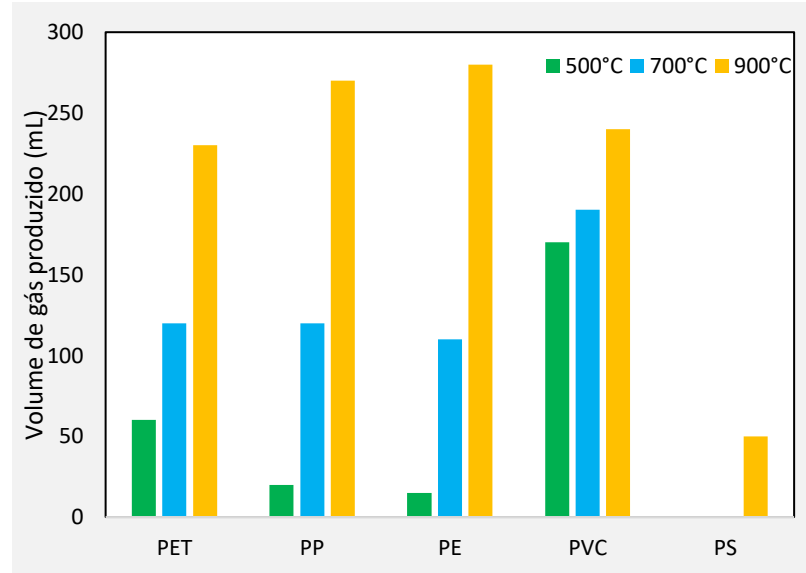
Dentre os outros produtos formados no processo de pirólise, de uma forma geral, todos podem ser separados e purificados sem que comprometam o funcionamento dos equipamentos e do processo.

3.2 FORMAÇÃO DO GÁS DE PIRÓLISE POR TIPO DE CARGA

O produto de maior interesse na pirólise plástica que se tem em mente para este trabalho é o óleo pirolítico, que é um produto líquido obtido a partir da condensação do gás de pirólise formado. Além deste produto são formados produtos sólidos e gasosos com menores valor agregado. Tanto o óleo quanto o sólido e o gás variam em composição de acordo com o que foi exposto na Seção 3.1.

Para uma mesma quantidade de plástico utilizado, pode-se obter diferentes quantidades de gás de pirólise de acordo com a carga inicial, conforme pode ser observado no Figura 1. Esta proporção foi obtida a partir de amostras de 500 mg de diferentes tipos de plástico e submetidas a diferentes temperaturas de pirólise (HONUS *et al.*, 2018). Estes resultados serão utilizados como base das discussões feitas nas próximas seções.

Figura 1: Quantidade de gás obtida por tipo de plástico pirolisado



Fonte: HONUS *et al.* (2018)

De acordo com os dados do Figura 1, observa-se um aumento substancial da produção de gás com aumento da temperatura empregada. Por conta da presença de diversas insaturações e de moléculas de hidrocarbonetos mais pesadas, a produção de gás a partir de PS (referenciado anteriormente como PSAl) é observada apenas a 900 °C; no gás proveniente do PVC há a menor variação; para o gás oriundo do PET, duplicou-se o volume obtido a cada 200 °C acrescidos; por fim, o comportamento da produção de gás a partir de PP e PE apresentou tendência semelhante entre as temperaturas apresentadas, sendo gerado um volume mais de duas vezes maior de gás quando a temperatura do reator de pirólise foi elevada para 900 °C.

3.3 COMPOSIÇÃO DOS GASES

A composição do gás formado após o processamento dos plásticos é de extrema importância para o projeto das etapas de separação e purificação, além da geração de produtos subsequentes. Como exemplo, tem-se o monóxido de carbono, que é tóxico ao organismo humano, mas interessante para produção de uma vasta variedade de produtos químicos.

As composições típicas dos gases de pirólise, em função do tipo de plástico, reportada por Honus *et al.* (2018) são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Proporção dos componentes dos gases de pirólise

Tipo de plástico	Hidrogênio (H ₂)			Hidrocarboneto (C _x H _y)			Monóxido de carbono (CO) e Dióxido de carbono (CO ₂)		
	500 °C	700 °C	900 °C	500 °C	700 °C	900 °C	500 °C	700 °C	900 °C
PET	6%	12%	20%	4%	12%	10%	38% CO 50% CO ₂	40% CO 32% CO ₂	34% CO 32% CO ₂
PP	14%	8%	15%	84%	90%	82%	0%	0%	0%
PE	16%	6%	14%	80%	90%	84%	0%	0%	0%
PVC	40%	52%	68%	60%	46%	32%	0%	0%	0%
PS	0%	0%	44%	90%	90%	54%	0%	0%	0%

Fonte: HONUS *et al.* (2018)

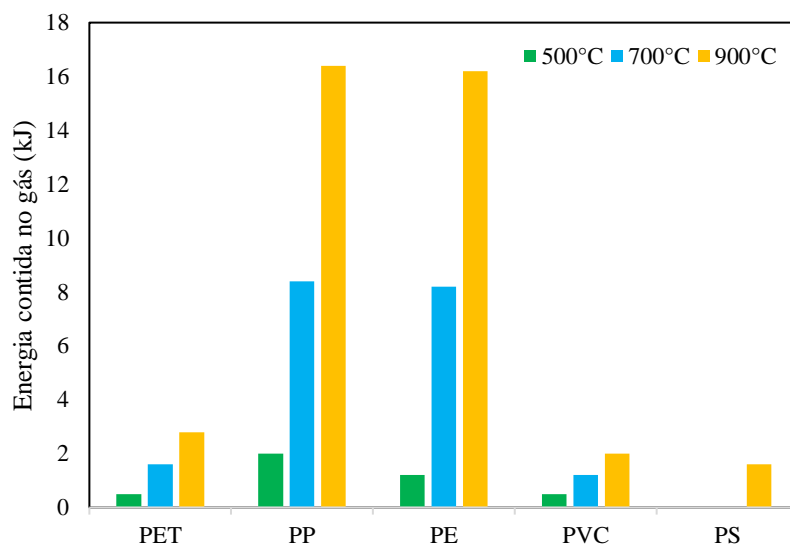
De acordo com os dados da Tabela 4, à medida que a temperatura de pirólise é elevada, há um aumento da quantidade de hidrogênio presente em três dos cinco tipos de plásticos (PET, PVC e PS). No entanto, nos dois outros tipos (PP e PE) não foi observada alteração muito expressiva entre as temperaturas de 500 °C e 900 °C; no entanto há um aumento em 700 °C, e um decréscimo em 900 °C, pois há uma decomposição de hidrocarbonetos formados. Em relação à presença de hidrocarbonetos, na temperatura de 700 °C tem-se a maior proporção em quatro dos cinco tipos de plástico, e apenas no PVC o aumento da temperatura para 700 °C leva à diminuição da quantidade deste tipo de composto. Apenas no gás de PET há a presença dos gases monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), pois este é o único polímero que contém oxigênio em sua fórmula.

Dentre os hidrocarbonetos tem-se a distinção de acordo com a cadeia carbônica e com a presença ou não de insaturação. Estas características também são importantes para qualificar o gás formado, além de serem fundamentais para a escolha do processo de separação. À medida que se aumenta a temperatura há uma diminuição da presença de insaturações, bem como do tamanho da cadeia carbônica. Como exemplo, o metano é encontrado em todos os gases e temperaturas; já cadeias com seis carbonos são encontradas, em pequenas quantidades, apenas nos gases provenientes de PP e de PE em temperaturas de 500 °C e 700 °C (HONUS *et al.*, 2018).

3.4 ENERGIA TOTAL DOS GASES

Outro fator importante em relação ao gás produzido pela pirólise de plástico é a energia total contida nele. Quanto mais energia química armazenada no gás, que foi expressa em termos da quantidade dos componentes inflamáveis, maior será seu potencial calorífico nos produtos subsequentes. O Figura 2 apresenta a energia contida nos gases gerados a partir de cada tipo de plástico em função da temperatura (HONUS *et al.*, 2018).

Figura 2: Energia contida em cada tipo gás produzido



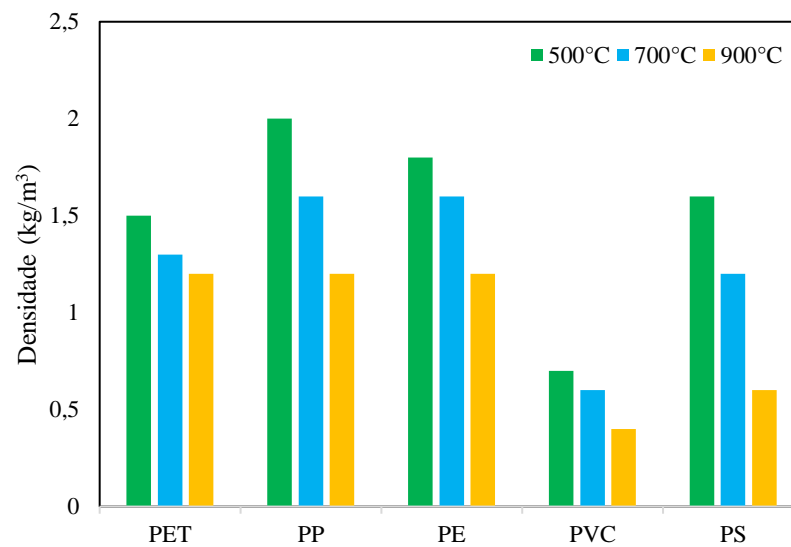
Fonte: HONUS *et al.* (2018)

Novamente, a temperatura empregada tem papel fundamental no atributo mapeado. A principal variação encontra-se nos plásticos PP e PE, tendo estes uma energia máxima de 16,4 kJ. A quantidade de energia está ligada à quantidade de gás produzida. No entanto pode-se observar que a quantidade de energia no gás proveniente de PET e PVC é baixa em relação às quantidades obtidas dos mesmos apresentadas no Figura 1. Esta diferença de energia está diretamente ligada aos tipos de ligação, cadeias carbônicas e componentes contidos em cada um dos tipos de plástico.

3.5 DENSIDADE DOS GASES

Por possuir alta proporção de hidrogênio, o gás de PVC é o único que, em todas as temperaturas, será menos denso que o ar atmosférico, além do PS na temperatura de 900 °C. O mais denso entre os gases apresentados é o de PP, em todas as temperaturas. Estas densidades podem ser observadas no Figura 3 (HONUS *et al.*, 2018).

Figura 3: Densidade dos gases



Fonte: HONUS *et al.* (2018)

4. PROCESSO E EQUIPAMENTOS

O processo de pirólise pode ser subdividido em etapas, a saber: a) preparação da matéria-prima, onde são avaliados os resíduos a serem utilizados, possíveis misturas e é feito o pré-tratamento; b) processamento, onde define-se os parâmetros empregados, como temperatura e pressão, e as condições do processo, como a presença ou não de catalisador; c) pós-tratamento, envolvendo destilação e destinação do(s) produto(s) final(is).

Além das etapas do processo de pirólise, os itens a seguir são importantes na definição do processo: a) produtos formados no processo, contendo produtos sólidos, líquidos e gasosos bem como suas caracterizações e aplicações; b) insumos, energia elétrica consumida e equipamentos necessárias;

Neste capítulo, o projeto da planta piloto de pirólise de plástico, dividido nas referidas etapas, é discutido a partir de exemplos da literatura, de modo a se chegar em uma configuração que tenha como enfoque os interesses deste trabalho. Algumas combinações de equipamentos e produtos são prioritárias, assim como algumas combinações são inviabilizadas por conta de incompatibilidades.

Para casos em que o produto deve ser importado e seu preço foi encontrado apenas em dólar, será aplicada uma taxa de importação de 60 % sobre o valor total (Receita Federal, 2023). Além disto, foi considerada uma cotação correspondente a R\$ 4,95 para cada \$ 1,00; esta foi a cotação média de maio de 2023.

4.1 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Esta etapa representa a seleção e caracterização da carga a ser utilizada na pirólise, tendo em vista que cada tipo de plástico empregado e a sua proporção, acarretará na obtenção de tipos de produtos com características diferentes.

4.1.1 SELEÇÃO DO PLÁSTICO

A partir dos resíduos plásticos disponibilizados pelo ReciclaCT, deve-se avaliar qual a melhor mistura para prosseguimento do processo. Dificuldades operacionais, bem como a qualidade do produto, devem ser consideradas nesta etapa. Portanto, de acordo com os dados reportados no Capítulo 2, em que foram detalhadas as características dos resíduos obtidos no Centro de Tecnologia da UFRJ, e as considerações acerca dos produtos formados em função dos tipos de plástico no Capítulo 3, pode-se observar que a maior dificuldade seria a formação de compostos clorados a partir do PVC. É reportado que existem formas de realizar a desclorificação do PVC utilizando aditivos alcalinos (ZHAO *et al.*, 2017), no entanto tais técnicas são custosas e demandaria o acréscimo de novas etapas ao processo, o que pode inviabilizar no investimento da construção da planta piloto.

Para o PET, a dificuldade por conta da formação de ácido ftálico e seus derivados pode ser contornada com a utilização de catalisadores e temperatura ideal (JIA *et al.*, 2020), embora isso também implique em maiores custos.

Diante disto, para fins de formação de gás de pirólise, decidiu-se proceder com quatro dos cinco tipos de plástico disponibilizados (PP, PS, PE e PET), ou seja, por volta de 24% da coleta não será utilizada. Pode-se destinar o PVC a outros tipos de reciclagem, como já é feito.

O pré-tratamento do plástico envolve: a) separação, para evitar a contaminação com outros resíduos, tais como metal; b) transporte, para locomoção e carga do reator; e c) uniformização, para obter o plástico no tamanho mais próximo do ideal. De acordo com o reator a ser utilizado a seleção deve ser mais ou menos rigorosa. Por exemplo, em reatores de leito fluidizado é necessário que a matéria-prima esteja o mais uniformizada possível (Quereshi, *et. al*, 2020).

A separação e o transporte são etapas já realizadas pelo ReciclaCT. Desta forma, pode-se concluir que o principal acréscimo a se considerar neste trabalho vem a ser a uniformização do resíduo. Para isto, podem ser empregados dois tipos de trituradores: hidráulico e parafuso.

4.1.2 RESTRIÇÕES

A partir do plástico disponibilizado pelo ReciclaCT, deve-se avaliar qual a melhor mistura para prosseguimento do processo. Dificuldades operacionais, bem como a qualidade do produto, devem ser consideradas nesta etapa. Portanto, de acordo com os dados reportados no Capítulo 2, em que foram detalhadas as características dos resíduos obtidos no Centro de Tecnologia da UFRJ, e as considerações acerca dos produtos formados em função dos tipos de plástico no capítulo 3, pode-se observar que a maior dificuldade seria a formação de compostos clorados a partir do PVC. É reportado que existem formas de realizar a desclorificação do PVC utilizando aditivos alcalinos (ZHAO *et al.*, 2017), no entanto tais técnicas são custosas e demandaria o acréscimo de novas etapas ao processo.

Para o PET, a dificuldade por conta da formação de ácido ftálico e seus derivados pode ser contornada com a utilização de catalisadores e temperatura ideal (JIA *et al.*, 2020), embora isso também implique em maiores custos.

Desta forma, para fins de formação de gás de pirólise, decidiu-se proceder com quatro dos cinco tipos de plástico disponibilizados (PP, PS, PE e PET), ou seja, por volta de 24% da coleta não será utilizada. Pode-se destinar o PVC a outros tipos de reciclagem, como já é feito.

O pré-tratamento do plástico envolve: a) separação, para evitar a contaminação com outros resíduos, tais como metal; b) transporte, para locomoção e carga do reator; e c) uniformização, para obter o plástico no tamanho mais próximo do ideal. De acordo com o reator a ser utilizado a seleção deve ser mais ou menos rigorosa. Por exemplo, em reatores de leito fluidizado é necessário que a matéria-prima esteja o mais uniformizada possível (Quereshi *et. al*, 2020).

A separação e o transporte são etapas já realizadas pelo ReciclaCT. Desta forma, pode-se concluir que o principal acréscimo a se considerar neste trabalho vem a ser a uniformização do resíduo. Para isto, podem ser empregados dois tipos de trituradores: hidráulico e parafuso.

4.1.3 TRITURADOR

Trituradores do tipo parafuso possuem dificuldade em processar filmes plásticos, pois eles tentam a ficar presos nas hastes. A coleta realizada pelo ReciclaCT indica a presença de alguns plásticos filmes, no entanto estes possuem em sua composição o PVC. Como este tipo de plástico foi descartado para não haver presença de compostos clorados no produto de pirólise, não há problema em se utilizar um triturador do tipo parafuso. Trituradores hidráulicos são mais onerosos, tanto no custo quanto na operação, de forma que se obtém uma clara vantagem em se utilizar o tipo parafuso (QURESHI *et al.*, 2020). Os trituradores apresentados são compatíveis com diversos tipos de plástico, bem como suas apresentações.

A etapa de pré-tratamento pode ser realizada sob demanda e varia de acordo com o material que será recebido pelo ReciclaCT, desta forma não haveria empecilho em agrupar uma certa quantidade de plástico para realizar o procedimento. A capacidade estimada foi baseada nas coletas feitas nos anos anteriores à pandemia de COVID-19, ou seja, 5 toneladas/ano ou aproximadamente 420 kg/mês. Em todos os casos analisados a seguir, o diâmetro final das partículas pode variar entre 1 mm e 5 mm, de acordo com os *sites* dos fornecedores.

O triturador de modelo LXT-180[®], observado na Figura 4, é o mais básico de uma série de oito modelos diferentes da *Lesintor Mechanical* (China). Suas principais diferenças são: capacidade de trituração, potência elétrica, número de facas fixas e rotatórias, tamanho e peso. Levando em consideração as premissas apresentadas na Sessão 4.1.2, não há necessidade da utilização de um equipamento com capacidade elevada. Desta forma, o equipamento LXT-180[®] foi selecionado.

O equipamento selecionado possui potência de 3 HP, tendo seu consumo de energia elétrica em 380 V (50 Hz); possui 9 facas rotatórias e 2 fixas. Seu peso é de aproximadamente 120 kg, com dimensões de 630 mm x 520 mm x 950 mm e capacidade de processamento de 50-100 kg/h. Seu valor em junho de 2023 é de \$ 550,00; aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, o valor final é de R\$ 4.356,00,00 (sem incluir o frete). Os outros modelos LXT-250[®], LXT-3000[®], LXT-400[®], LXT-500[®], LXT-600[®], LXT-800[®] e LXT-1000[®], que possuem capacidades de processamento variando entre 150 kg/h e 1500 kg/h (Alibaba, 2023).

Figura 4: Triturador LXT-180®



Fonte: Lesintor Mechanical (2023)

O triturador da Figura 5 é o modelo TLP2520® da *Guangzhou Tyrone Enronmental Tchnology CO. LTD.* (China). Ele possui características semelhantes ao equipamento da Figura 4, e a partir deste fato, esse modelo foi selecionado. O equipamento possui potência de 5 HP, tendo seu consumo de energia elétrica em 380V (50Hz) e possui 15 facas rotatórias e 2 fixas. Seu peso é de aproximadamente 300 kg, com dimensões de 1020 mm x 670 mm x 1090 mm e capacidade de processamento de 60-150 kg/h. Seu valor em junho de 2023 é de \$ 620,00; aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 4.910,40 (sem incluir o frete). Os outros modelos da série TLP3126®, TLP4128® e TLP5032®, que possuem capacidades de processamento variando entre 100 kg/h e 400kg/h (Alibaba, 2023).

Figura 5: Triturador TLP2520®



Fonte: Guangzhou Tyrone (2023)

Com as considerações apresentadas, o modelo ZL-PC180® (Figura 6) da *Dongguan New Zillion Machinery CO. LTD.* (China) foi selecionado. O equipamento possui potência de 3 HP, tendo seu consumo de energia elétrica em 380 V (50 Hz). Não há especificidade da quantidade de facas utilizadas. Seu peso é de aproximadamente 150 kg, com dimensões de 500 mm x 420

mm x 1000 mm e sua capacidade de processamento é de 80-120 kg/h. Seu valor em junho de 2023 é de \$ 500,00 aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 3.960,00 (sem incluir o frete). Os outros modelos da série ZL-PC250®, ZL-PC300®, ZL-PC400®, ZL-PC500®, ZL-PC500®, ZL-PC600®, ZL-PC600®, ZL-PC700®, ZL-PC800® e ZL-PC1000®, que possuem capacidades de processamento que variam entre 130 kg/h e 1500kg/h (Alibaba, 2023). Não foram encontrados equipamentos nacionais a serem avaliados.

Figura 6: Triturador ZL-PC180®



Fonte: Dongguan New Zillion (2023)

4.1.4 PENEIRA

Após a trituração, o pré-tratamento do plástico segue com a etapa de peneiramento. Para garantir a eficácia, principalmente da etapa seguinte, é necessário garantir que o diâmetro das partículas esteja de acordo com a especificidade do processo e do reator utilizado. Segundo MAQSOOD *et al.* (2021), geralmente, as partículas de plástico devem ter um tamanho menor do que 6 mm para serem processadas com eficiência em um reator de pirólise. No entanto, algumas tecnologias podem aceitar tamanhos maiores de partículas.

É importante lembrar que o tamanho das partículas de plástico pode afetar a eficiência da pirólise, bem como a qualidade dos produtos gerados. Partículas muito grandes podem levar a uma conversão incompleta de plástico em produtos de pirólise, enquanto partículas muito pequenas podem levar a uma alta produção de resíduos e uma redução da qualidade dos produtos gerados. Portanto, o tamanho das partículas de plástico deve ser cuidadosamente controlado para maximizar a eficiência e qualidade da pirólise. Para pirólise rápida, que é a

utilizada neste processo (consultar Seção 4.2.3), deve-se utilizar partículas de até 1 mm (MAQSOOD *et al.*, 2021).

Pensando em atingir a granulometria ideal para utilização no processo, faz-se necessário a utilização de uma peneira para selecionar partículas que estão aptas a serem empregadas no processo. A peneira deve ser acoplada à saída do triturador para haver a seleção do material que está próprio para ser utilizado; o material que ficar retido pela peneira deve retornar ao triturador a fim de adequá-lo para a etapa seguinte.

Mediante às ponderações apresentadas foram encontrados modelos contendo malhas com abertura nominal de 1 mm de diâmetro. O modelo da CasaLab exibido na Figura 7 foi selecionado. Este equipamento é uma peneira quadrada confeccionada de ferro zincado. A peneira possui 50 cm x 50 cm de área e 10 cm de altura, conferindo um volume total utilizável de 25.000 cm³. Já considerando o frete para a Escola de Química-UFRJ, o valor de uma unidade em 06/2023 era de R\$ 1.031,50 (CasaLab, 2023).

Figura 7: Peneira CasaLab



Fonte: CasaLab (2023)

Outro modelo encontrado foi o da empresa Bertel (Figura 8). Esta peneira redonda feita de aço inoxidável possui 20 cm de diâmetro e 5 cm de altura, conferindo um volume total utilizável aproximadamente de 1.571 cm³. Já considerando o frete para a Escola de Química-UFRJ, o valor de uma unidade em 06/2023 era de R\$ 295 (Halmem, 2023).

Figura 8: Peneira Bertel



Fonte: Halmem (2023)

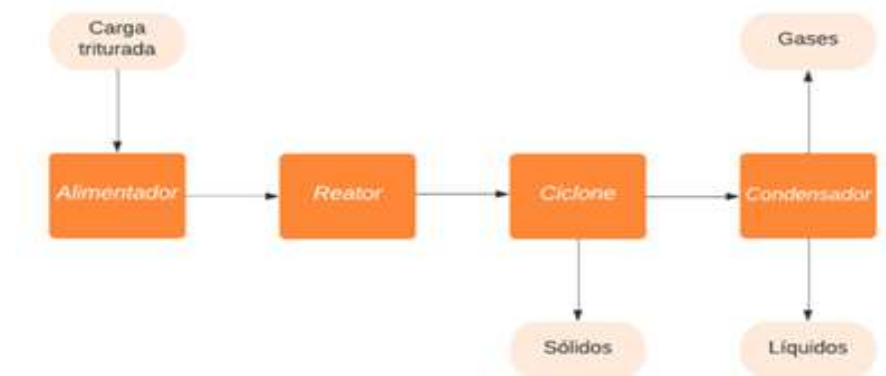
Um terceiro modelo, sem imagem disponível, foi encontrado. Trata-se do modelo em aço inoxidável da empresa Tyler contendo 12,7 cm de diâmetro e 5 cm de altura, conferindo um volume total utilizável aproximadamente de 633 cm³. Já considerando o frete para a Escola de Química-UFRJ, o valor de uma unidade em 06/2023 era de R\$ 218,12 (Casa Americana, 2023).

4.2 PROCESSAMENTO

Após o pré-tratamento do plástico gerando pequenas partículas, inicia-se o processo de pirólise em si. A partir da alimentação do plástico no reator, não se deve permitir o acesso de ar atmosférico nas etapas subsequentes, principalmente na etapa de despolimerização realizada no reator. Isto se dá por conta de o processo de pirólise ser estritamente sensível à presença de oxigênio. Na presença deste composto ocorre a combustão do material, findando a possibilidade de se obter os produtos de maior interesse.

Inicialmente a carga é disposta no alimentador. Em seguida, seu mecanismo despeja a carga no reator. Após o fim da reação, o produto é levado para um ciclone onde componentes sólidos são removidos pela parte inferior, e a fase gasosa é levada a um condensador a fim de liquefazê-la e obter os produtos condensado. Por fim, obtém-se três fases de produtos: sólida, líquida e gasosa (RIEDEWALD *et al.*, 2021). Este processo pode ser observado de forma simplificada na Figura 9. A temperatura, a pressão e o tipo de reator empregados devem estar de acordo com os produtos desejados, bem como a mistura de plástico a ser alimentado no reator.

Figura 9: Diagrama de blocos simplificado do processo de pirólise e obtenção dos produtos



Fonte: Elaboração própria

4.2.1 ALIMENTADOR

É extremamente importante impossibilitar a entrada do oxigênio no sistema. A etapa de alimentação é primordial para o bloqueio do ar; sendo assim, faz-se necessário um sistema de alimentação que possibilite a entrada da carga sem que haja entrada de ar.

A seleção de um alimentador adequado evita a formação de aglomerados de partículas plásticas que podem obstruir o fluxo de alimentação. Visando este ponto, utiliza-se um alimentador parafuso com uma velocidade de alimentação entre 10 e 30 kg/h, conforme abordado por Kaminsky *et. al* (2021).

Pequenas impurezas, como partículas de metais e pedras, conseguem ser decantadas em uma zona específica formada pela inclinação formada entre o alimentador e o reator. A conexão com fundo do tanque deve possuir uma inclinação de aproximadamente 15° para que ocorra a devida decantação do material mais denso (KAMINSKY *et al.*, 2021).

Então, para seleção dos alimentadores, tais características devem ser consideradas. Não foram encontrados equipamentos nacionais a serem avaliados. O primeiro deles, presente na Figura 10, é o modelo ZHONGDE® da empresa *Shandong Zhongde Machine Tool Accessories Producing Co. Ltd.* (CHINA). Sua potência é de 3kW e seu consumo de energia elétrica é feito em 380 V (50 Hz). Suas dimensões são de 2 m de altura, 3,57 m de comprimento e sua largura é definida pelo seu tanque que possui dimensões 0,7 m x 0,7 m. Seu valor em junho de 2023 é

de \$ 450,00; aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 3.564,00 (sem incluir o frete) (Made-in-China, 2023).

Figura 10: Alimentador tipo parafuso ZHONGDE®



Fonte: Made-in-China (2023)

Já o segundo modelo (Figura 11) é da empresa *Zhengzhou Hengyou Machinery Manufacturing Co.,Ltd.* (CHINA), semelhante ao modelo ZHONGDE® (Figura 10). Sua potência também é de 3kW e seu consumo de energia elétrica é feito em 380 V (50 Hz). Suas dimensões são customizáveis, mas para fins de comparação serão utilizadas as mesmas do equipamento anterior: 2 m de altura, 3,57 m de comprimento e sua largura é definida pelo seu tanque que possui dimensões 0,7 m x 0,7 m. Seu valor em junho de 2023 é de \$ 500,00; aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de \$ 800 com a cotação média de maio de 2023 (\$ 1,00 correspondendo a R\$ 4,95) o valor é de R\$ 3.960,00 (sem incluir o frete) (Alibaba, 2023).

Figura 11: Alimentador tipo parafuso ZHENGZHOU®



Fonte: Alibaba (2023)

4.2.2 REATOR

O reator a ser empregado no processo é de vital importância e a correta escolha deste está diretamente relacionada ao tempo de residência da carga, à taxa de transferência de calor e à eficiência, além de ter papel primordial para garantir o contato entre catalisadores e reagentes.

Conforme apresentado por QURESHI *et al.* (2020), para a escolha do reator deve-se levar em consideração: a eficiência na transferência de massa e de calor. Outros fatores a serem considerados são: controle de temperatura, tamanho utilizável, tempo de residência, flexibilidade do processo, operação da etapa térmica, operação da etapa catalítica, quantidade de produto obtido e viabilidade econômica. Como apresentado no Capítulo 2, há a necessidade de ser empregado catalisadores no processo. Por conta disto, serão apresentados reatores compatíveis com esta aplicação. Os principais são os reatores de leito fixo e os reatores de leito fluidizado (QURESHI *et al.*, 2020).

Além dos reatores de fluxo contínuo citados no parágrafo anterior, existe a possibilidade de realização da pirólise de plásticos em reator do tipo batelada. Conforme apresentado por Sharuddin *et al.* (2016), os reatores do tipo batelada são sistemas fechados sem entrada e saída de corrente enquanto a reação está ocorrendo. Seu *design* mais simples e o bom controle de parâmetros racionais são suas principais vantagens. No entanto, considerando uma pirólise catalítica, este tipo de reator não é recomendado, pois devido ao elevado tempo de reação, ocorre a formação de uma quantidade considerável de coque que acaba sendo depositado nos poros do catalisador, impossibilitando estes componentes de atuarem de forma adequada.

Outros tipos de reatores foram descartados, principalmente por: dificuldade no controle do tempo de residência, no caso de extrusores; alto tempo de residência, em reatores com forno rotatório, o que leva a um elevado gradiente de temperatura sendo difícil controlar a composição do produto (KAMINSKY *et al.*, 1999).

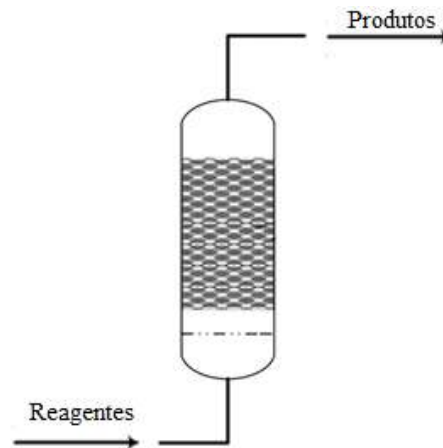
Vale ressaltar que a análise realizada foi enfocada na pirólise de resíduo plástico com interesse na produção do óleo pirolítico, e pode ser ajustada para outros tipos de resíduos posteriormente.

4.2.2.1 REATOR DE LEITO FIXO

Neste tipo de reator os reagentes entram pela parte inferior, passando por um difusor e, em seguida, passam pelo leito catalítico. Por fim, os produtos e os reagentes que não reagiram saem pela parte superior, conforme Figura 12. Geralmente o catalisador é empregado de forma paletizada e o fluxo no interior do reator é gerado através da diferença de pressão entre a base e o topo (DIXON *et al.*, 2020).

Desafios encontrados na operação deste tipo de reator envolvem a distribuição irregular das partículas do catalisador e a necessidade intrínseca ao processo de se manter uma distribuição uniforme da matéria-prima utilizada. Entretanto, em escalas laboratoriais, onde o controle de parâmetros fica mais acessível, este tipo de reator é amplamente empregado com finalidade específica qualitativa (SAAD *et al.*, 2015)

Figura 12: Representação de reator de leito fixo



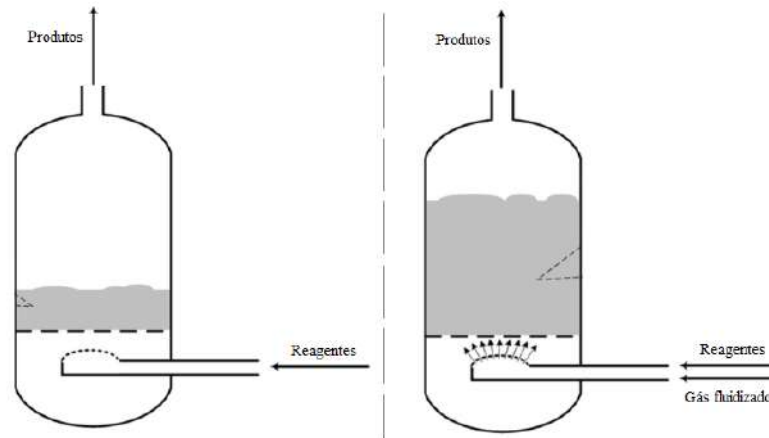
Fonte: Sharuddin (2016) (adaptado)

4.2.2.2 REATOR DE LEITO FLUIDIZADO

Nos reatores de leito fluidizado ocorre a mistura da carga com o catalisador, que fica disposto de forma livre no interior do reator enquanto esta mistura é fluidizada. A fluidização ocorre por conta da passagem do gás, este interage com o catalisador – de granulometria menor que a carga –, adquirindo, desta forma, propriedades de fase líquida. Este mecanismo permite aumentar a área de contato catalisador-carga acarretando uma excelente transferência de calor e massa. Assim, reduz-se variabilidades do processo e do produto (KAMINSKY *et al.*, 1999). Pode-se observar na Figura 13 o aumento do volume do leito ao iniciar a fluidização. Devido a

isto, o volume total do tanque deve ser a menos o dobro da carga para que haja suporte quando o leito for fluidizado (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Figura 13: Representação de reator de leito fluidizado



Fonte: Sharuddin (2016) (adaptado)

4.2.2.3 COMPARAÇÃO: LEITO FIXO X FLUIDIZADO

Apesar de possuir custos mais elevados e uma operação mais complexa, o reator de leito fluidizado apresenta vantagem em todos os outros aspectos analisados. Em média e grande escalas, as taxas de transferência de calor e de massa são primordiais para manter o processo uniforme. Desta forma o reator selecionado foi o de leito fluidizado. Uma maior comparação de diferentes características pode ser observada na Quadro 3.

Quadro 3: Comparação Leito fixo x Leito fluidizado

Parâmetros	Reator de Leito Fixo	Reator de Leito Fluidizado
Controle de temperatura	Ruim	Bom
Transferência de calor e de massa	Ruim	Bom
Tamanho utilizável	Bom	Bom
Tempo de residência	Bom	Bom
Operação da etapa térmica	Médio	Bom
Operação da etapa catalítica	Médio	Bom
Scale-up	Médio	Bom
Custos	Bom	Médio
Operação em geral	Bom	Médio

Fonte: Elaboração própria

4.2.2.3 SELEÇÃO DO REATOR

Por ser necessária a utilização de um reator com leito fluidizado, faz-se necessário um dimensionamento específico deste equipamento. Para tal elaboração diversos parâmetros devem ser levados em consideração, tais como: tempo de residência, que está descrito no tópico 4.3, características do leito catalítico, compatibilidade entre o material utilizado na confecção e os compostos envolvidos na pirólise, interação entre partículas, possíveis reações secundárias, tamanho do equipamento, área a ser utilizada, energia elétrica, energia térmica, entre outros. Devido à complexidade deste procedimento, o presente trabalho não abordará este tópico, ficando, desta forma, uma sugestão para um trabalho futuro (PEPIOT, P.; DESJARDINS, O., 2012).

Existem estudos que apontam a necessidade de um pré-aquecimento antes da entrada da carga diretamente no leito fluidizado. Para isto, pode ser utilizado, por exemplo, um forno rotativo com a finalidade de aquecer o plástico alterando seu estado físico e facilitando a etapa de fluidização. No entanto, não foram encontradas evidências científicas comprobatórias.

4.3 TEMPERATURA

No processo de pirólise um dos mais importantes parâmetros a serem analisados é a temperatura do reator. A temperatura de pirólise pode variar de 300 °C a 900 °C. Serão apresentadas apenas as técnicas de pirólise mais comuns envolvendo a presença de catalisadores.

4.3.1 PIRÓLISE LENTA

Este é considerado um processo não isotérmico, ou seja, a temperatura do sistema não é mantida constante – a taxa de calor é mantida por volta de 10 °C/s. Neste processo, a parte volátil do plástico evapora parcialmente. Em comparação com processos de pirólise com temperaturas mais altas, este tipo de pirólise apresenta vantagens desde uma melhor transferência de calor, por conta da baixa taxa de aquecimento, até um melhor controle dos fluxos de entrada de matéria-prima e saída de produto. Esta técnica prioriza a formação de

produtos sólidos, como o carvão, em detrimento da formação de gases e líquidos (Eze *et al.*, 2021), pelo uso de baixas temperaturas (MAQSOOD *et al.*, 2021).

4.3.2 PIRÓLISE RÁPIDA

Neste tipo de pirólise o plástico é submetido a uma temperatura mediana entre 400 °C e 700 °C, sem que haja aumento gradual de temperatura. Desta forma, este é considerado um processo “isotérmico”. A taxa de transferência de calor pode chegar a 200 °C/s, sendo mais comum manter-se por volta de 37 °C/s a 95 °C/s. Já o tempo de residência é de apenas alguns segundos. Há uma recomendação de se utilizar o tempo de 2 segundos, pois tempos maiores favorecem reações secundárias como o craqueamento térmico (MAQSOOD *et al.*, 2021).

A priorização é de formação de produtos líquidos, já que o plástico é degradado rapidamente provocando a formação de moléculas mais leves. Com o aumento da temperatura há também o favorecimento da formação de gases leves no produto gasoso e de compostos aromáticos no produto líquido, sendo o método mais comumente empregado para pirólise (EZE *et al.*, 2021).

4.3.3 PIRÓLISE FLASH

Este é considerado um processo extremamente rápido cuja taxa de aquecimento pode variar de 100 °C/s a 10000 °C/s. O tempo de residência é ainda menor que o da pirólise rápida, sendo necessário apenas 0,5 s para a realização do processo. Os produtos formados neste processo são majoritariamente gasosos (EZE *et al.*, 2021).

As partículas de plástico utilizadas devem possuir diâmetros extremamente pequenos, necessariamente dentro da faixa 105 µm a 250 µm (MAQSOOD *et al.*, 2021). Esta necessidade pode ser uma restrição ao processo de pré-tratamento.

4.3.4 DEFINIÇÃO DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE

Conforme apresentado no Capítulo 3, a temperatura ótima para a produção de hidrocarbonetos está entre 500 °C e 700 °C. Desta forma, somando à observação anterior com

relação ao pré-tratamento, pode-se concluir que a melhor técnica a ser empregada é a pirólise rápida com 2 segundos de tempo de residência.

Utilizando a pirólise lenta o gasto com energia térmica seria menor. Todavia, o resultado esperado não será atingido e a formação majoritária seria de carvão. Já a utilização de pirólise *flash* pode degradar os catalisadores, além de ser necessária uma maior quantidade de energia no processo em relação aos outros tipos de pirólise avaliadas. Outro ponto desfavorável, de acordo com a Tabela 4, é a diminuição da presença de hidrocarbonetos com o aumento de temperatura para 900 °C.

4.4 CATALISADOR

Ao empregar um catalisador em um processo químico, deseja-se acelerar uma reação química específica (ou mais de uma) através da diminuição de sua energia de ativação. Por conta disto, estes tipos de compostos são amplamente empregados na indústria química visando otimização e seletividade. Pesquisas como a de SHARUDIN *et al.* (2016) confirmam que o uso de catalisadores na pirólise de plásticos implica no aumento de formação de hidrocarbonetos bem como o aprimoramento dos produtos gerados.

A presença de catalisadores no processo implica na redução da temperatura ótima do processo. Por conta da elevada utilização de energia térmica na pirólise, faz-se necessária a utilização destes compostos com o objetivo de reduzir a quantidade de energia usada, com a consequente diminuição de gastos e degradação de materiais.

Ao selecionar o plástico PET para a carga de pirólise, deve-se ter cautela para evitar a formação do ácido ftálico e seus derivados, conforme mencionado no Capítulo 3. Para este fim entra, também, a aplicação de catalisadores. A presença de cadeias carbônicas contendo oxigênio pode contaminar o produto com compostos indesejados. Entretanto, a remoção do grupamento carboxila presente no ácido ftálico, composto gerado na degradação do PET, pode ser executada através da aplicação de zeólitas combinadas com cloreto de níquel (NiCl₂) (JIA *et al.*, 2020).

Este catalisador, combinação de zeólitas com cloreto de níquel, pode ser preparado através da calcinação de zeólitas a 550 °C por 6 h, seguida da mistura desta com o cloreto. É importante

manter todo o catalisador fora do alcance de água para manter suas propriedades intactas. As zeólitas são uma combinação de dióxido de silício com óxido de alumínio. É necessária uma proporção de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de aproximadamente 46/1 (JIA *et al.*, 2020). A Zeólita ZMS-5 está representada na Figura 14 e o cloreto de níquel na Figura 15.

Figura 14: Zeólitas ZMS-5



Fonte: Zibo Linxi Chemical Co. Ltd. (2023)

As zeólitas são encontradas com valores \$ 3,15/kg pela empresa *Zibo Linxi Chemical* (China); aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 24,95/kg (sem incluir o frete). Um outro fornecedor, a empresa chinesa *Hebei Tianhuibao Technology*, possui um valor menor para compras feitas acima de 1 kg: \$ 2,20/kg; aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 17,42/kg (sem incluir o frete). É importante frisar que não foram encontrados fornecedores nacionais.

Figura 15: Cloreto de níquel



Fonte: FairSky Special Chemicals (2023)

O cloreto de níquel é encontrado apenas hidratado para compra. Para utilização será necessário realizar a remoção da água. Através da empresa *FairSky Special Chemicals* (China), encontra-se o sal pelo valor de \$ 6,00/kg; aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 47,52/kg (sem incluir o frete). O foco deste tópico é apresentar o procedimento de preparação do catalisador; este procedimento não será detalhado, e pode ser realizado em conjunto com laboratórios da Escola de Química-UFRJ,

Existem fornecedores nacionais oferecendo o produto com preço mais elevado, porém com entrega mais rápida e com custos de transporte menores. Através da empresa OPQ Química, encontra-se o sal pelo valor de R\$ 173,00/kg e, através da Quimisul o valor é de R\$ 185,38/kg, ambos os preços contam com o frete.

Além do tipo do catalisador também é importante atentar-se ao tamanho das partículas de catalisador. Partículas menores tendem a aumentar a taxa de transferência de calor interna, provocando um aumento da temperatura no meio reacional. A temperatura do leito pirolítico possui papel fundamental na composição do produto produzido (SUSASTRIAWAN *et al.*, 2020).

Considerando a proporção encontrada por WONG *et al.* (2023) como a mais interessante para produzir mais gás de pirólise e menos material sólido, utiliza-se a proporção de 1,0 g de plástico para 0,2 g de Zeólita. Já o NiCl_2 é um componente apenas para o PET, desta forma utilizou-se a proporção de 0,5 g deste catalisador para cada 1 g de PET (JIA *et al.*, 2020).

É importante ressaltar que, até o presente momento, não há definições claras sobre o emprego de catalisadores no processo de pirólise. Isto se dá, principalmente, por conta da rápida perda da atividade deste tipo de composto quando utilizado na pirólise plástica. Existem estudos científicos, como os apresentados neste Tópico 4.4, que indicam possibilidades de utilização. No entanto, este ainda é um assunto de longos debates e pesquisas.

4.2.4 INERTIZAÇÃO E FLUIDIZAÇÃO

Conforme definição apresentada no tópico anterior, haverá necessidade de um fluido para fluidização do tanque. O gás fluidizante é um gás inerte que participa não apenas da suspensão das partículas, mas que tem papel fundamental na inertização do reator como um todo – tendo em vista que o processo de pirólise precisa ocorrer na ausência de oxigênio – e que, por fim,

auxilia no transporte do produto gasoso para fora do reator. Existem diversos compostos que podem ser utilizados com este propósito na pirólise de plásticos, como nitrogênio, hélio, argônio, etileno, propileno e hidrogênio (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Segundo Abadi *et al.* (2014), a distribuição dos produtos da pirólise catalítica é afetada pelo peso molecular do gás transportador. Gases mais leves foram capazes de produzir uma grande quantidade de produto condensado em seu trabalho. Conforme apresentado na Tabela 5, os gases utilizados para fluidização de pirólise de plásticos que produzem um produto com menor quantidade de sólidos e maior proporção de condensáveis são etileno, N₂, He e H₂.

Tabela 5: Comparação entre gases fluidizantes

Gás utilizado	Massa molecular (g/mol)	Proporção de produto condensado	Proporção de produto sólido
H ₂	2	96,70%	0,30%
He	4	94,70%	2,10%
N ₂	28	92,30%	3,60%
Etileno	28	93,80%	1,10%
Propileno	42	87,80%	2,50%
Ar	37	84,80%	5,40%
Sem gás	51,3	33,80%	Indeterminado

Fonte: Abadi *et al.* (2014)

Considerando a disponibilidade cada um destes gases, pode-se concluir que o nitrogênio é o de mais fácil acesso. De acordo com a Tabela 5, o etileno produz uma maior quantidade de produto líquido e uma menor formação do produto sólido do que o nitrogênio. Este ponto pode ser justificado por conta da maior reatividade do etileno, quando comparada à do nitrogênio. Desta forma, o equilíbrio reacional é deslocado no sentido da produção de mais produto líquido. Outro fato comum aos dois é o peso molecular. No entanto, entre os gases apresentados, o nitrogênio é o mais comumente utilizado pela maioria dos pesquisadores como gás de fluidização na pirólise de plásticos, pois é mais seguro de se manusear do que gases altamente reativos, como hidrogênio, etileno e propileno, devido ao seu risco de inflamabilidade. Mesmo podendo produzir um alto rendimento de produto líquido, o hélio é raramente usado devido à disponibilidade limitada e ao custo mais elevado em comparação ao nitrogênio (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Além da natureza do gás utilizado, também é de extrema importância o controle do fluxo do gás. Por conta da lentidão causada por fluxos baixos (300 mL/min) a degradação cai bruscamente formando mais produto sólido. Para definição da taxa de fluidização será necessário conhecer o reator a ser aplicado no processo. No entanto, conforme abordado em 4.2.2.3, o reator deve ser definido posteriormente; portanto, não será definida uma taxa de fluidização para o processo, neste momento.

Para utilização do gás, tanto para inertização quanto para fluidização, foi encontrado um fornecedor nacional, utilizou-se como base o cilindro de 50 L. Através da empresa Oxigás, considerando o frete para a Escola de Química da UFRJ, o valor é de R\$ 2.659,00.

4.2.6 CICLONE

Após a formação de produtos na pirólise, a corrente de saída do reator estará contaminada com partículas sólidas, principalmente coque e pequena parte de catalisador. Este coque contém alta quantidade de componentes orgânicos com natureza poliaromática. A razão entre carbono e hidrogênio fica em torno de dois. Com a finalidade de remover estes compostos sólidos da corrente gasosa é utilizado um ciclone com especificações capazes de reter partículas maiores que 10 μm (CHO *et al.*, 2010).

Foram encontrados três modelos de ciclones, também conhecidos como coletores de poeira. O primeiro ciclone é o da empresa *Botou Xintian Environmental Products* (Figura 16) e possui uma potência elétrica de 1,5 kW utilizando uma tensão de 380 V. Não foi disponibilizada mais informações como sua eficiência e suas dimensões exatas. Seu valor em junho de 2023 é de \$ 1.650,00; aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 13.068,00 (sem incluir o frete) (Alibaba, 2023).

Figura 16: Ciclone HMC-24



Fonte: Botou Xintian Environmental Products (2023)

Já o segundo ciclone (Figura 17) é o modelo AW-3201 da empresa *Qingdao Always Tech Co. Ltd.* Este ciclone possibilita captura de partícula de até $0,3 \mu\text{m}$. Seu peso é de 3.000 kg e suas dimensões são de 2,3 m x 2,6 m x 4,6 m. Observa-se pelas dimensões que é um equipamento robusto. No entanto, este equipamento pode ser utilizado para coletar partículas de outros processos, desde coleta de poeira do ambiente à coleta de partículas geradas em processos de combustão, além da própria pirólise, o que leva a possuir uma vantagem em sua instalação. Não foi possível encontrar sua especificação de potência elétrica. Seu valor em junho de 2023 é de \$ 1.600,00 aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 12.672,00 (sem incluir o frete) (Alibaba, 2023).

Figura 17: Ciclone AW-C3201



Fonte: Qingdao Always Tech Co. Ltd. (2023)

Por fim, tem-se o equipamento da empresa *Cangzhou Blue Ocean Environmental Equipaments Co. Ltd.*, modelo JBXF1.1-00 (Figura 18). Ele possui as seguintes dimensões 1,5

m x 1,5 m x 3,5 m, com aproximadamente 1.000 kg. Sua capacidade de retenção de partículas também é de 0,3 μm . Seu valor em junho de 2023 é de \$ 1.890,00; aplicando a taxa e a cotação mencionada no início do Capítulo 4, valor final é de R\$ 14.968,00 (sem incluir o frete) (Alibaba, 2023).

Figura 18: Ciclone JBXF1.1-00



Fonte: Cangzhou Blue Ocean Environmental Equipaments Co. Ltd. (2023)

4.2.7 CONDENSADOR

Após a passagem pelo separador, o vapor produzido pela pirólise será encaminhado a um condensador a fim de liquefazer componentes condensáveis. O vapor contém componentes condensáveis, formadores do produto líquido, e componentes não-condensáveis nas condições empregadas, fração gasosa do produto.

A fração condensável ao passar pelo condensador formará o óleo de pirólise. Enquanto a fração não condensável, formada principalmente de metano e propano, pode ser armazenada para outras finalidades conforme apresentado na Seção 4.3 (RIEDEWALD *et al.*, 2021). A troca térmica pode ser realizada através de *spray towers* (ou *scrubbers*) ou trocadores casco e tubo.

As *spray towers* borrifam um solvente refrigerante, pode ser utilizada água em alguns casos, para resfriar o vapor. Embora este equipamento possua boa eficiência, o contato direto entre o refrigerante e o vapor da pirólise pode resultar em reações de craqueamento dentro da coluna, diminuindo o rendimento final. Já trocadores de calor casco e tubo são mais comuns nas escalas piloto de pirólise por conta da não interação direta entre os gases e o refrigerante (PAPARI *et al.*, 2018).

Para definição do condensador é necessário saber a quantidade de gás pirólítico que será formado. No entanto, para tal informação é necessário estabelecer o reator do processo. Como não foi possível dimensionar o reator, no momento, foram apresentados modelos importados de trocador casco e tubo com possibilidade de aplicação. É importante salientar que este equipamento pode ser modificado dependente do reator dimensionado. O primeiro deles é da empresa *Qingli Heatexchanger Co. Ltd.* (Figura 19). A área de troca térmica é de $3,47 \text{ m}^2$. O diâmetro do tubo interno é de 273 mm e seu comprimento é de 1,5 m. Seu valor em junho de 2023 é de \$ 640,75; aplicando a taxa de importação de 60 % (Receita Federal, 2023) o valor final é de \$ 1.025,20 com a cotação média de maio de 2023 (\$ 1,00 correspondendo a R\$ 4,95) o valor é de R\$ 5.074,74 (já com frete incluso) (Alibaba, 2023). Não foi encontrada a especificação de potência elétrica.

Figura 19: Trocador de calor Qingli



Fonte: *Guangzhou Liyuan Electromechanical Equipment Co., Ltd.* (2023)

O segundo modelo encontrado é da empresa *Wuhan Qiaoxin Refrigeration Equipment Co., Ltd.* (Figura 20) e possui especificação mais claras: possui capacidade de refrigeração de $60,48 \cdot 10^4 \text{ kcal/h}$ e diâmetro interno de 426 mm. Seu valor em junho de 2023 é de \$ 500,00; aplicando a taxa de importação de 60 % (Receita Federal, 2023) o valor final é de \$ 800,00 com a cotação média de maio de 2023 (\$ 1,00 correspondendo a R\$ 4,95) o valor é de R\$ 3.960,00 (sem incluir o frete) (Alibaba, 2023).

Figura 20: Trocador de calor QXC160S16A

Fonte: Wuhan Qiaoxin Refrigeration Equipment Co., Ltd. (2023)

4.3 PRODUTOS

No processo de pirólise são produzidos diversos compostos que podem ser divididos majoritariamente em três categorias de produtos de acordo com seus estados físicos: sólido, líquido e gasoso. A forma mais viável de controlar o processamento e favorecer a formação de um dos tipos de produtos está relacionada ao controle de parâmetros do processo, que podem ser regulados e otimizados visando formações específicas (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

As características dos plásticos demonstram como este tipo de material é propenso a formar mais matéria líquida em seu processo de pirólise. Conforme apresentado na Tabela 6, o teor de matéria volátil é alto ficando em mais de 90 % (porcentagem em massa relativa) para todos os tipos de plástico, e o teor de cinzas é baixo, variando de 0 a 3 %.

Tabela 6: Propriedades físico-químicas dos plásticos

	Umidade (% massa)	Carbonos fixos (% massa)	Matéria volátil (% massa)	Cinzas (% massa)
PS	0,25	0,12	99,63	0
PET	0,46	7,77	91,75	0,02
PP	0,15	1,22	95,08	3,55
PEAD	0	0,01	99,81	0,18
PVC	0,8	6,3	93,7	0

Fonte: Saruddin *et al.*, 2016

Desta forma pode-se concluir que o produto principal da pirólise plástica é o óleo líquido, sendo gases, cera e carvão os subprodutos. Também há presença de ácido clorídrico na presença do PVC, no entanto este composto não foi incluído na elaboração deste trabalho.

Parâmetros apresentados no presente trabalho, como, taxa de aquecimento, temperatura empregada, tipo de reator, tipo de catalisador e tempo de residência, são os principais fatores que favorecem a formação de um dado produto além de implicar diretamente no rendimento do processo pirolítico (MAQSOOD *et al.*, 2021).

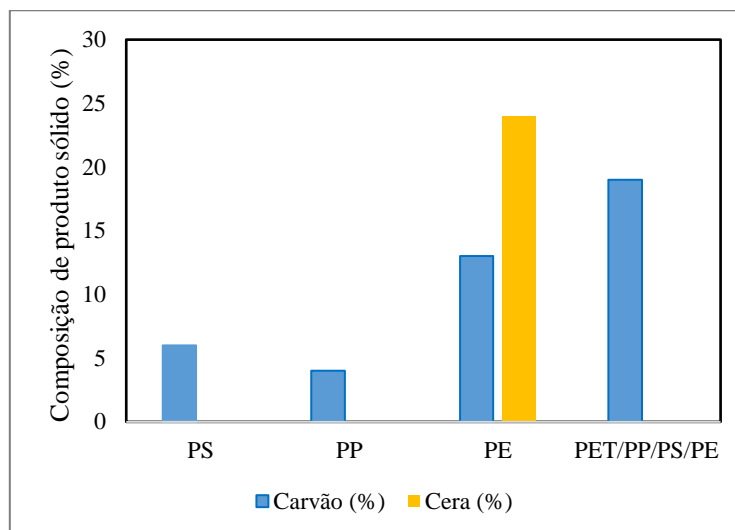
4.3.1 PRODUTOS SÓLIDOS

O produto sólido não possui grande interesse comercial, principalmente por conta da baixa presença de compostos de cadeia carbônica que podem ser utilizados como combustível, por exemplo. A composição destes produtos envolve a presença de dois compostos principais: carvão e cera.

A formação do carvão é relacionada com baixas taxas de aquecimento e altos tempos de residência, dificultando a formação de compostos mais voláteis. A composição deste composto varia muito de acordo com a carga utilizada e com os parâmetros aplicados. No entanto, é formada majoritariamente por carbono fixos, além de umidade e cinzas (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

A cera pode ser definida como um composto sólido que possui característica de ser flexível em temperaturas ambientes e ao ser aquecida muda de fase rapidamente apresentando-se com baixa viscosidade. Sua formação está ligada a presença de grandes cadeias carbônicas nos resíduos utilizados como matéria-prima. Este subproduto é gerado na presença de PE, e menor quantidade na presença de PP, tendo em vista sua longa cadeia carbônica o produto gerado não chega a transformar-se em líquido e mantém-se em forma de cera (MAQSOOD *et al.*, 2021). Na Figura 21, pode-se observar proporção de produtos sólidos na pirólise de diferentes tipos de plásticos nas mesmas condições e parâmetros do processo e à 450°C.

Figura 21: Composição de produtos sólidos na pirólise de determinados plásticos



Fonte: MAQSOOD *et al.* (2021)

A formação destes produtos, dentre outras ações, provoca a inativação de sítios catalíticos. Por conta disto, diminui a eficiência dos catalisadores empregados e, conseqüentemente, gera mais formação de carvão, já que uma das funções dos catalisadores é o favorecimento da reação completa gerando produtos líquidos e gasoso. Quando depositados nos catalisadores, os sólidos são denominados de coque (LI *et al.*, 2014).

A utilização deste material no mercado pode tanto ser feita como fonte combustível para aquecimentos mais brandos, 1 kg tem energia suficiente para aquecer 1 L de água da temperatura ambiente ao ponto de ebulição em 13 min, ou até mesmo como material adsorvente de metais pesados e corantes em águas residuais. Além disto, o carvão pode ser utilizado como matéria-prima para formação de carvão ativado e para geração de energia em caldeira (MIANDAD *et al.*, 2016). Este produto é rico em metais, que geram um impacto ambiental considerável em caso de descarte realizado de forma incorreta. Portanto, a utilização deste tipo de composto deve ser avaliada de acordo com o propósito: dentro da Escola de Química-UFRJ, a utilização poderia ser feita dentro de disciplinas voltadas a compostos inorgânicos.

4.3.2 PRODUTOS GASOSOS

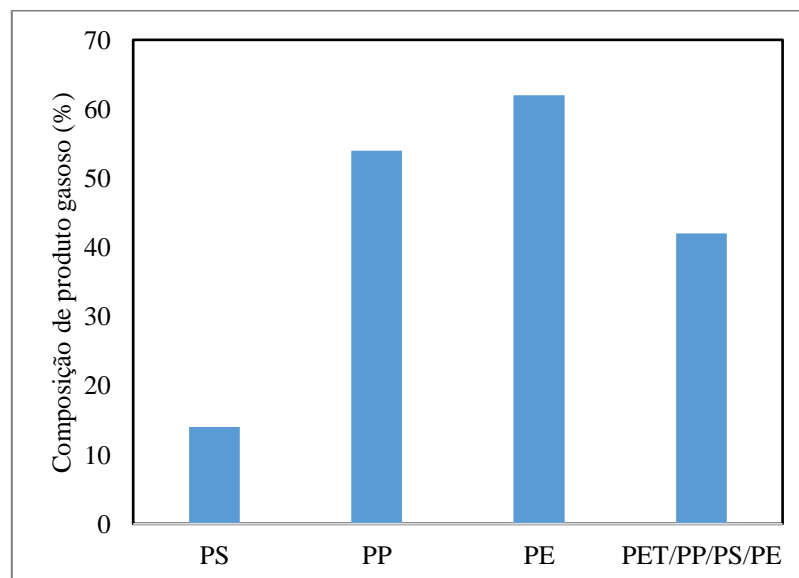
Gases também são considerados subprodutos do processo de pirólise, mesmo possuindo valor comercial agregado. Sua composição, assim como os outros produtos, é bastante variável dependendo da matéria-prima empregada e dos parâmetros usados. No entanto, em geral, a parte gasosa formada é composta de mistura de hidrocarbonetos com cadeia curtas, geralmente com

quatro carbonos podendo chegar a seis, podendo ou não conter insaturação, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e ácido clorídrico, em caso de utilização do PVC. Devido, principalmente, à presença do gás hidrogênio e dos hidrocarbonetos o gás formado possui alto poder calorífico e, portanto, pode ser comercializado e utilizado como combustível (MAQSOOD *et al.*, 2021).

O favorecimento da formação de gases através da pirólise está ligado à aplicação de altas temperaturas por um longo tempo de residência, estes aspectos geram maior poder reacional fazendo com que a reação de formação de cadeias menores e com pontos de ebulição mais baixos seja favorecida. A utilização destes gases, por possuir poder calorífico considerável, pode ser feita dentro do próprio processo. Neste caso, podem ser empregados sem a utilização de qualquer procedimento de tratamento robusto para gerar energia térmica ao ser utilizada em caldeiras ou em energia elétrica se for empregada em turbinas a gás. Além disso, compostos como propeno e eteno podem ser utilizados como matéria-prima para produzir olefinas, que são compostos de alto valor agregado (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Na Figura 22, está representado a proporção de produtos gasosos na pirólise de diferentes tipos de plásticos nas mesmas condições e parâmetros do processo à 450°C.

Figura 22: Composição de produtos gasosos na pirólise de determinados plásticos



Fonte: MAQSOOD *et al.* (2021)

A composição do gás deve estar sob constante análise, pois uma elevada formação, principalmente, proveniente do PET pode significar a formação de compostos oxigenados como o monóxido e dióxido de carbono. Como estes compostos possuem baixo valor agregado, o

processo deve ser controlado de forma que a geração destes seja reduzida; isto pode ser realizado utilizando devidamente os catalisadores apresentados na Subseção 4.2.3; os catalisadores também são favorecedores da formação de produtos gasosos, por conta da aceleração no processo de craqueamento (MIANDAD *et al.*, 2016).

A separação dos produtos gasosos e líquidos é feita inicialmente na etapa de condensação, apresentada na Subseção 4.2.4, onde grande parte do gás proveniente do reator de pirólise é liquefeita e removida do sistema em forma de líquido, em seguida é levada a um setor de separação, usualmente um destilador. A parte não liquefeita é rica em nitrogênio, proveniente principalmente da fluidização do leito, e compostos oxigenados, que podem ser removidos do sistema e levados para seus devidos destinos (KAFLE *et al.*, 2023).

4.3.3 PRODUTOS LÍQUIDOS

Como principal e mais importante produto da pirólise tem-se os produtos líquidos, também denominados óleos. Este produto possui elevado potencial para ser utilizado como fonte alternativa de energia, principalmente, por possui características semelhantes ao óleo diesel, conforme apresentado na Tabela 7 (MIANDAD *et al.*, 2016). Dentre as características apresentadas, apenas o ponto de fluidez possui uma discrepância comparando-se o óleo diesel convencional com óleos provenientes de pirólise.

Tabela 7: Características físico-química do diesel convencional e de outros óleos provenientes de pirólise

Característica	Composto	Valor	Característica	Composto	Valor
Densidade (g/cm ³)	Óleo pirolítico de PEAD	0,79	Poder calorífico (MJ/kg)	Óleo pirolítico de PEAD	45,86
	Óleo pirolítico de mistura (PP+PS+PE+PET+PVC)	0,8355		Óleo pirolítico de mistura (PP+PS+PE+PET+PVC)	44,4
	Diesel convencional	0,815-0,870		Diesel convencional	46,67
Viscosidade (mm ² /s)	Óleo pirolítico de PEAD	2,1	Ponto de fluidez	Óleo pirolítico de PEAD	-15
	Óleo pirolítico de mistura (PP+PS+PE+PET+PVC)	2,5		Óleo pirolítico PP/PS	0,134328
	Diesel convencional	2,0-5,0		Diesel convencional	6
Ponto de ebulição (C°)	Óleo pirolítico de PEAD	-	Ponto Flash (C°)	Óleo pirolítico de PEAD	48
	Óleo pirolítico PP	68-346		Óleo pirolítico PP/PS	30/26
	Diesel convencional	150-390		Diesel convencional	52

Fonte: Miandad *et al.* (2016)

A composição do óleo é extremamente variável e pode conter entre 300 e 400 tipos diferentes de compostos provenientes dos diferentes tipos de plásticos empregados. Além da matéria-prima, parâmetros e condições do processo são responsáveis por essa gama diversa de compostos no óleo (MAQSOOD *et al.*, 2021).

O armazenamento do óleo pirolítico precisa ser realizado adequadamente para que ele não perca materiais voláteis, evitando assim o aumento de sua viscosidade (MAQSOOD *et al.*, 2021).

Existem estudos que comprovam a eficácia na mistura do óleo pirolítico com o óleo diesel. Por exemplo, Nileshkumar *et al.* (2015) realizaram experimentos com misturas contendo proporções variadas de óleo pirolítico proveniente de plásticos e óleo diesel: a mistura contendo 20 % do óleo pirolítico apresentou características extremamente semelhantes ao diesel puro, já a proporção de 30 % conferiu maior valor agregado, considerando eficiência da máquina utilizada e emissão de compostos tóxicos à atmosfera. Uma vantagem apresentada por Kumar *et al.* (2013) é a diminuição da emissão de compostos inorgânicos de carbono, como CO e CO₂, comparando-se a combustão da mistura com a combustão do diesel puro.

4.4 PÓS-TRATAMENTO

4.4.1 DESTILAÇÃO

O óleo bruto obtido a partir do processo de pirólise dos resíduos plásticos possui compostos carbônicos de cadeias que podem chegar até 25 carbonos, bem como outros diversos produtos de cadeias cíclicas (WIRIYAUMPAIWONG *et al.*, 2017). Com intuito de separar os compostos presentes no óleo pode-se utilizar o processo de destilação através de diversos métodos, como por exemplo destilação catalítica, fracionada, molecular e à vácuo.

No método de destilação metanol-água apresentado por Wang *et al.* (2015) foi realizado o enriquecimento de ligninas provenientes da pirólise de biomassa. A produção de gasolina e diesel proveniente do óleo de pneus foi realizada utilizando-se destilação catalítica (WANG *et al.*, 2015). Já para óleo obtido a partir de algas, foi utilizada uma coluna de destilação à vácuo para produção de quatro frações com diferentes compostos, separados por ponto de ebulição e volatilidade; três frações foram condensadas como destilados e, por fim, a última fração foi obtida como produto sólido (CHOI *et al.*, 2017).

Estudos específicos relacionados à destilação de pirólise plástica, que o tema principal do presente estudo, são escassos. Todavia, foi reportado por Wiriyumpaiwong *et al.* (2017) um estudo feito utilizando a destilação simples para óleo pirolítico obtido a partir de plásticos. A destilação foi realizada da seguinte forma: destilação inicial à 180 °C por 60 min, em seguida novas destilação por 90 min, desta vez na temperatura de 150 °C e novamente em 180 °C. Esta sequência de destilação produz uma variação no aspecto físico do óleo, passando de amarelado, após a destilação de 180°C, a incolor, após a destilação de 150°C. O óleo obtido, por fim, possui densidade e viscosidade próximas às da gasolina, sendo ambas abaixo dos valores obtidos pré-destilação; a taxa de destilação não se mostrou constante, possuindo valores mais elevados no início e diminuindo gradualmente ao longo do procedimento.

Conforme apresentado existem diversas formas de realizar o processo de destilação para um óleo obtido através da pirólise. As definições para esta etapa do processo não serão abordadas neste trabalho, por conta da complexidade e necessidade da avaliação do produto para elaborar e definir qual processo será o mais adequado, bem como quais especificações serão necessárias para a destilação.

4.4.2 PURIFICAÇÃO

Por conter diversos tipos de compostos, muitos destes com baixo valor agregado, faz-se necessário realizar uma purificação do óleo obtido e agregar valor comercial ao produto. Existem diversas técnicas que podem ser empregadas, dentre as quais a destilação apresentada na Subseção 4.4.1.

Outras tecnologias têm sido desenvolvidas por grandes empresas com o intuito de valorizar o produto e apoiar o movimento da economia circular, sem deixar de se preocupar com rejeitos formados e custos envolvidos. Uma destas tecnologias são os adsorventes HDMAX[®] da Clariant, que são projetados para realizar a purificação do óleo pirolítico removendo impurezas e contaminantes presentes na carga inicial e outras que possam ter sido agregadas ao longo do processo; a formação final compõem um óleo compatível com plantas de etileno (Clariant, 2023).

Existem também tecnologias específicas para purificação dos rejeitos sólidos. Missau *et al.* (2020) realizaram um estudo acerca da utilização de diversos materiais para purificação de cera formada na pirólise do plástico HDPE; os materiais utilizados foram: perlita, vidro de

origem vulcânica de composição riolítica com óxidos (óxidos metálicos de silício, ferro, alumínio e magnésio), areia e cinzas de casca de arroz. O meio filtrante foi um revestimento de nylon-6. O melhor resultado obtido foi utilizando a perlita, onde foi gerado um maior volume do produto. Tal situação se deve a perlita possuir maior porosidade e menor resistência específica facilitando o escoamento dos produtos de interesse.

A purificação apresenta-se como um processo de pós-tratamento extremamente importante para produto obtido na pirólise. No entanto, as definições para esta etapa não serão apresentadas neste trabalho por conta do enfoque no processo pirolítico em si.

4.4.3 REJEITOS E RESÍDUOS

Por definição, compostos que não formam os produtos de interesse, mas podem ser reaproveitados são considerados resíduos do processo; já aqueles que não podem ser reutilizados, por conta de suas características físico-químicas ou de seu valor agregado, são denominados rejeitos.

Ao longo deste trabalho foram apresentados diversos compostos que podem ou não, ser tratados com a finalidade de aprimorar suas características e seu valor agregado: carvão, cera, gases, óleos, dentre outros. Para analisar quais compostos podem ser considerados produtos, resíduos ou rejeitos é preciso avaliar as propriedades e aplicações de cada um deles.

Conforme apresentado na Subseção 4.3.2, a composição do produto gasoso formado apresenta uma gama de produtos orgânicos e de produtos inorgânicos, principalmente H_2 , NO_x , CO , CO_2 . Destes, o hidrogênio é o que possui maior valor agregado por conta de suas aplicações como combustível. Por conta disto, este composto é perigoso e deve ser armazenado de forma segura. Os demais são considerados poluentes para o meio ambiente e devem ser tratados a fim de mitigar os danos causados na emissão direta na atmosfera.

A aplicação do CO_2 e CO está relacionada a formação de ácidos carboxílicos, álcoois e alcenos (SARAVANAN *et al.*, 2021). Já os NO_x podem ser utilizados para produção de compostos orgânicos, explosivos, defensivos agrícolas e até mesmo produtos hospitalares, como anestésicos. Todavia, para realizar a separação destes gases é necessária a aplicação de processos de condensação com pressões diversificadas ou processo utilizando membranas (BERNARDO *et al.*, 2009), que não serão abordadas neste trabalho.

5. PERSPECTIVAS SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO NA ESCOLA DE QUÍMICA DA UFRJ

A partir dos dados apresentados ao longo dos capítulos deste trabalho, foi calculado o volume mensal médio de plástico utilizando-se a Tabela 3 desconsiderando a quantidade de PVC e os anos de Pandemia COVID 2019. Desta forma, os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Volume mensal recebido pelo ReciclaCT

Material	Quantidade média anual (kg)	Quantidade média mensal (kg)	Proporção	Densidade a temperatura ambiente (kg/L)	Volume mensal (L)
PSAI	253	21,08	7%	1,07	19,70
PET	1.756	146,33	45%	1,36	107,60
PP	1.205	100,42	31%	0,90	111,57
PEAD	658	54,83	17%	0,96	57,12
Total	3.872	322,67	100%	-	295,99

Fonte: REICLACT-UFRJ (2022)

Pode-se observar que o volume mensal disponibilizado para o processo é de aproximadamente 296 L de plástico. Além do plástico, deve-se preencher o leito do reator com os catalisadores: 73,17 kg de NiCl_2 e 64,53 kg de zeólita.

Em seguida, deve haver a inertização do reator com o nitrogênio. Nesta etapa, foi considerado que o reator está vazio e será preenchido com nitrogênio; desta forma, o ar interno será expelido para fora do reator. Para isto é preciso seguir a norma ABNT NBR 14.973:2010, esta informa “A proporção mínima de nitrogênio a ser utilizada deve ser de um cilindro de 9 m^3 para cada 5 m^3 do compartimento do tanque”. Portanto, considerando um reator de escala piloto com volume total de 250 L, deve-se utilizar 450 L de nitrogênio para concluir a inertização do tanque.

Com o valor obtido na Seção 4.2.5, o preço total de N_2 para inertização seria de R\$ 23.931,00. Este valor pode ser diminuído caso a Escola de Química possua gás nitrogênio à granel para utilização. Para o controle da inertização, faz-se necessário um sistema de controle e segurança, que não será abordado neste trabalho. Este mesmo fluido será utilizado como fluidizante. Após selecionar a carga, os catalisadores e o fluido fluidizante, foram selecionados os equipamentos a serem empregados no processo, conforme Tabela 9.

Tabela 9: Seleção dos equipamentos para a planta piloto

Tipo do equipamento	Seleção do equipamento	Valor (R\$)	Potência elétrica (w)	Área ocupada (m²)
Triturador	ZL-PC180®	3.960,00	2.237	0,68
Peneira	Bertel	295,00	-	-
Alimentador	ZHONGDE®	3.564,00	3.000	0,49
Reator	-	-	-	-
Ciclone	AW-3201®	12.672,00	1.500*	5,98
Condensador	Wuhan Qiaoxin Refrigeration Equipment Co., Ltd.	3.960,00	1.000*	1,50
Total	-	24451,00	7.737	8,65

***Especificação de modelo semelhante**

Fonte: Elaboração própria

Através da Tabela 9, observa-se que o valor dos equipamentos necessários para o processo fica em aproximadamente R\$ 24451,00. Vale ressaltar que o valor do reator que será projetado posteriormente não foi incluído. Além disto, o frete de alguns produtos não fora incluído nas cotações, pois faz-se necessário um alinhamento sobre o porto de recebimento, bem como a rota de transporte. O custo de instalação é outro fator que também não foi considerado. A área aproximada para instalação é de aproximadamente 8,65 m², sem o reator, e a potência total dos equipamentos está próxima a 7.737 W, também sem o reator.

A utilização efetiva dos equipamentos gera um custo com energia elétrica. Em média, por hora utilizado, o processo consumirá 7,74 kWh. Conforme informação da Light (2023), o preço de 1 kWh é de R\$ 0,754. há um custo adicional que varia de acordo com as condições de geração de energia – bandeiras tarifárias. Para o cálculo a seguir foi considerada a bandeira amarela, onde há um acréscimo de R\$ 2,98 a cada 100 kWh utilizado. Desta forma, pode-se chegar a um custo de energia de R\$ 5,84 por hora. Vale ressaltar que o reator é um equipamento que consome uma alta energia elétrica, o que aumentará o custo.

Conforme a Figura 2 apresenta, PP e PE são os dois tipos de plástico que geram gás pirolítico com maior energia interna, este critério foi utilizado para comparar o potencial energético de cada produto formado. Pela ordem de mais energético, o PET vem em seguida e

por fim o PS. A pirólise de PET gera uma quantidade grande de óxidos de carbono, este subproduto tende a ser diminuído com a aplicação dos catalisadores selecionados.

Conforme abordado por Sekar *et al.* (2022), o tipo e o *design* do reator estão ligados diretamente ao produto formado. Ficando, desta forma, extremamente imprecisa uma avaliação de valores comerciais para o óleo de pirólise formado.

6. CONCLUSÃO

Tendo em vista todas as considerações feitas ao longo do trabalho, pode-se chegar à conclusão que para instalar uma planta piloto de pirólise na Escola de Química-UFRJ utilizando como carga o plástico coletado pelo ReciclaCT-UFRJ deve-se disponibilizar de um espaço estimado em 9 m², mais a área ocupada pelo reator, para dispor os equipamentos. Além disto, será investido um valor de aproximadamente R\$24451,00 com equipamentos e acessórios essenciais, sem considerar o custo do reator. O custo de energia elétrica por hora de utilização, sem o reator, gira em torno de R\$ 5,84 por hora.

É importante ressaltar que os valores foram encontrados no mês de junho de 2023 e podem sofrer variações posteriores. Também é importante considerar a mão-de-obra que irá operar os equipamentos, esta mão-de-obra deve ser treinada adequadamente. Além disto, deve-se levar em consideração todos os procedimentos de segurança ambiental e do processo.

As aplicações para o óleo obtido são diversas. Conforme abordado ao longo do trabalho, o óleo possui valor comercial, portanto o mesmo pode ser comercializado a fim de arcar com os custos e aprimoramento do próprio processo, além de outros processos que possivelmente possam vir a ser beneficiados. Além disto a implementação do processo na Escola de Química-UFRJ possui finalidade exemplificadora e ilustradora, já que será possível acompanhar e operar um processo com diversas etapas e equipamentos intrínsecos à formação de um engenheiro e químico industrial.

Vale ressaltar que este levantamento de valores foi realizado com base em diversos estudos, e as composições dos produtos formados são extremamente variáveis. Portanto, para se ter uma ideia mais clara do valor agregado é necessário realizar um estudo laboratorial da carga a ser utilizada, esta é uma sugestão para um trabalho futuro. Outro fator que impacta diretamente no custo de instalação é a necessidade de equipamentos de medição e instrumentação, que dependendo de suas especificidades, possuem valores maiores que os dos equipamentos destacados neste trabalho.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 DIMENSIONAMENTO DO REATOR

Conforme apresentado no Tópico 4.2.2.3, o reator com leito fluidizado deve ser dimensionado para que possa ser incorporado ao processo descrito. Para isto, faz-se necessário um trabalho detalhando todos os parâmetros envolvendo este equipamento, bem como seu custo de confecção e de funcionamento.

7.2 MODELAGEM DO PROCESSO

A modelagem do processo auxilia na otimização do processo levando em consideração todas as etapas, parâmetros, materiais e equipamentos empregados. A aplicação de modelos matemáticos nas etapas do processo confere uma potencialização dos resultados.

7.3 AVALIAR O CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO NECESSÁRIOS PARA O PROCESSO

A segurança do processo e das pessoas envolvidas um ponto primordial em toda atividade. Controlar o processo impede a ocorrência de acidentes, além de garantir um bom funcionamento do processo com produtos sendo coletados conforme planejado.

7.4 ANÁLISE LABORATORIAL DA CARGA UTILIZADA

Conforme apresentado no trabalho, a matéria-prima utilizada está diretamente ligada ao produto gerado. Garantir uma uniformidade da carga, bem como impedir que impurezas e

matérias prejudiciais ao processo acessem o leito do reator, proporciona ao processo um caráter mais seguro e maior garantia de obtenção dos resultados almejados.

7.5 ANÁLISE LABORATORIAL DO PRODUTO

Garantir que o produto formado apresente as características desejadas e acompanhar a emissão de possíveis poluentes é uma responsabilidade intrínseca ao processo e deve ser monitorada e controlada por seus responsáveis.

7.6 AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE

Esta é uma sugestão que pode ser realizada em conjunto com o ReciclaCT. Além da carga plástica, outros materiais provenientes da coleta podem passar a compor a carga pirolítica. Resíduos hospitalares, pneus e outros polímeros possuem características próximas às dos plásticos utilizados e podem agregar ao processo futuramente.

Outra possibilidade é a ampliação da coleta seletiva realizada no Centro de Tecnologia da UFRJ-RJ para outros polos da Ilha do Fundão-RJ e, até mesmo, outros polos da própria Universidade Federal do Rio de Janeiro.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS-ABADI, M. S. *et al.* **Evaluation of pyrolysis process parameters on polypropylene degradation products.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 109, p. 272–277, 1 set., 2014.

Alibaba, 2023. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/PC180-3KW-4HP-Waste-Plastic-Crusher_62284407192.html?spm=a2700.pccps_detail.0.0.37173bca6wVk0R. Acesso em: junho de 2023).

Alibaba, 2023. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Small-Plastic-Shredder-Glass-Garbage_1600644476659.html?spm=a2700.shop_plser.41413.8.531a5ef7U8u1bo Acesso em: junho de 2023).

Alibaba, 2023. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/Waste-Plastic-Crusher-Small-Recycling-Machine_1600409852469.html?spm=a2700.details.0.0.2645c31aiA5a4I Acesso em: junho de 2023).

Alibaba, 2023. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-Sale-Laboratory-Chemical-Large-Double_1600700531272.html?spm=a2700.shop_plser.41413.3.7ed37277YntUuE Acesso em: junho de 2023).

Alibaba, 2023. Disponível em: https://portuguese.alibaba.com/p-detail/Mobile-1600417154594.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.d_cda151ednAMCr&s=p Acesso em: junho de 2023.

Alibaba, 2023. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/p-detail/China-1600262648802.html?spm=a2700.details.0.0.7d0e49a0osDOKQ> Acesso em: junho de 2023.

Alibaba, 2023. Disponível em: https://portuguese.alibaba.com/p-detail/WHGCM-1600621496975.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.34f366fffleqjw&s=p Acesso em: junho de 2023.

Alibaba, 2023. Disponível em: https://portuguese.alibaba.com/p-detail/Professional-1600666165158.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.8ed02877WCWRcI&s=p Acesso em: junho de 2023.

Alibaba, 2023. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/Methanol-To-Olefins-Mto-Catalyst-Synthetic_1600714641670.html?spm=a2700.7724857.0.0.14dd7f557PqaEJ&s=p Acesso em: junho de 2023.

Alibaba, 2023. Disponível em: <https://zblx.en.alibaba.com/minisiteentrance.html?spm=a2700.details.0.0.4dc47f9emXCPMO&from=detail&productId=1600209715014> Acesso em: junho de 2023.

ANUAR SHARUDDIN, S. D. *et al.* **A review on pyrolysis of plastic wastes.** Energy Conversion and Management Elsevier Ltd, 2016.

BORRELLE, S. B. *et al.* **Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution.**, 2020.

Casalab, 2023. Disponível em: <https://www.casalab.com.br/produtos/65/6970> Acesso em: junho de 2023).

CHOI, J. H.; KIM, S. S.; WOO, H. C. **Characteristics of vacuum fractional distillation from pyrolytic macroalgae (*Saccharina japonica*) bio-oil.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 51, p. 206–215, 2017.

Combine, 2023. Disponível em: <https://combine.ind.br/CJ-PENEIRA-COM-FURO-1MM-Pecas-Combine-1905-2470.asp#> Acesso em: junho de 2023).

DIXON, A. G.; PARTOPOUR, B. **Computational Fluid Dynamics for Fixed Bed Reactor Design.** 2020.

DOU, B. *et al.* **Research progress of hot gas filtration, desulphurization and HCl removal in coal-derived fuel gas: A review.** Chemical Engineering Research and Design, 2012.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. **Production, use, and fate of all plastics ever made.** 2017.

Halmen, 2023. Disponível em: https://www.loja.halmem.com.br/MLB-1013522806-peneira-granulometrica-inox-8x2-abertura-10mm-malha-18-_JM Acesso em: junho de 2023).

HONUS, S. *et al.* **Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part I: Production and physical properties.** Fuel, v. 221, p. 346–360, 2018.

JIA, *et al.* **Catalytic Fast Pyrolysis of Poly (Ethylene Terephthalate) (PET) with Zeolite and Nickel Chloride,** 2020

KAFLE, S. R.; GAIRE, P.; TULADHAR, N. Production of fuels by pyrolysis of waste plastics: technical notes. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1279, n. 1, p. 012008, 2023.

KAMINSKY, W.; KIM, J.-S. **Pyrolysis of mixed plastics into aromatics.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999.

KUMAR, S. *et al.* **Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine.** Energy Conversion and Management, v. 74, p. 323–331, 2013.

LUMSDEN, J **The Physical Properties of Heptoic Hexahydrobenzoic, and Benzoic Acids and their Derivatives.** Journal of the Chemical Society, v. 87, p.90-98, 1905.

MAQSOOD, T. *et al.* **Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 159, 2021.

Made in china, 2023. Disponível em: <https://zhongdetrade.en.made-in-china.com/product/txIRdvZVLicF/China-High-Quality-Multi-Specification-Stainless-Steel-Screw-Conveyor.html> Acesso em: junho de 2023.

Made in china, 2023. Disponível em: https://pt.made-in-china.com/co_fairskychem/product_Nickel-Chloride_hieryugog.html Acesso em: junho de 2023.

MIANDAD, R. *et al.* **Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review.** Process Safety and Environmental Protection Institution of Chemical Engineers, 2016.

MISSAU, J.; BERTUOL, D. A.; TANABE, E. H. **Development of a nanostructured filter for pyrolysis wax purification: Effects of particulate filter aids.** Particuology, v. 54, p. 164–172, 2021.

OPQQuimica, 2023. Disponível em: <https://opquimica.com.br/loja/produto/cloreto-de-niquel/>. Acesso em: junho de 2023.

PAPARI, S.; HAWBOLDT, K. **A review on condensing system for biomass pyrolysis process.** Fuel Processing Technology Elsevier B.V., 2018.

PAPUGA, S. V.; GVERO, P. M.; VUKIĆ, L. M. **Temperature and time influence on the waste plastics pyrolysis in the fixed bed reactor.** Thermal Science, v. 20, n. 2, p. 731–741, 2016.

PEPIOT, P.; DESJARDINS, O. **Numerical analysis of the dynamics of two- and three-dimensional fluidized bed reactors using an Euler–Lagrange approach.** Powder Technology, p. 104-121, 2012.

Quimisulsc, 2023. Disponível em:
https://www.quimisulsc.com.br/index.php?route=product/product&product_id=303 Acesso em: junho de 2023.

QURESHI, M. S. *et al.* **Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 152, 2020.

RIEDEWALD, F. *et al.* **Economic assessment of a 40,000 t/y mixed plastic waste pyrolysis plant using direct heat treatment with molten metal: A case study of a plant located in Belgium.** Waste Management, v. 120, p. 698–707, 2021.

SAAD, J. M.; NAHIL, M. A.; WILLIAMS, P. T. **Influence of process conditions on syngas production from the thermal processing of waste high density polyethylene.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 113, p. 35–40, 2015.

SARAVANAN, A. *et al.* **A comprehensive review on different approaches for CO₂ utilization and conversion pathways.** Chemical Engineering Science, v. 236, 2021.

SEKAR, M *et al.* **Production and utilization of pyrolysis oil from solidplastic wastes: A review on pyrolysis process and influence of reactors design.** Journal of Environmental Management, v. 302, part B, 2022

SUSASTRIAWAN, A. A. P.; PURNOMO; SANDRIA, A. **Experimental study the influence of zeolite size on low-temperature pyrolysis of low-density polyethylene plastic waste.** Thermal Science and Engineering Progress, v. 17, 2020.

WANG, B. *et al.* **Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator.** Applied Mathematical Modelling, v. 30, n. 11, p. 1326–1342, 2006.

WANG, Y. *et al.* **Separation and characterization of pyrolytic lignins from the heavy fraction of bio-oil by molecular distillation.** Separation and Purification Technology, v. 152, p. 123–132, 2015.

WIRIYAUMPAIWONG, S.; JAMRADLOEDLUK, J. **Distillation of Pyrolytic Oil Obtained from Fast Pyrolysis of Plastic Wastes.** Energy Procedia. Anais Elsevier Ltd, 2017.

WONG, S. L. *et al.* **Plastic pyrolysis over HZSM-5 zeolite and fluid catalytic cracking catalyst under ultra-fast heating.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 169, 2023.

Xtdustcollector, 2023. Disponível em: <https://www.xtdustcollector.com/cyclone-dust-collector-product/> Acesso em: junho de 2023.

ZHAO, P. *et al.* **Dechlorination of PVC wastes by hydrothermal treatment using alkaline additives.** Environmental Technology (United Kingdom), v. 39, n. 8, p. 977–985, 2018.