

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE  
DO SUL - *CAMPUS FELIZ*  
BACHAREL EM ENGENHARIA QUÍMICA

NATÁLIA DEWES NIENOV

**Estudo de reciclagem química por pirólise dos polímeros polietileno e polipropileno pelo  
procedimento de revisão sistemática e análise bibliométrica**

FELIZ  
2021

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE  
DO SUL - *CAMPUS FELIZ*  
BACHAREL EM ENGENHARIA QUÍMICA

NATÁLIA DEWES NIENOV

**Estudo de reciclagem química por pirólise dos polímeros polietileno e polipropileno pelo  
procedimento de revisão sistemática e análise bibliométrica**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Área da Engenharia Química: Tecnologia Química

Subárea: Reciclagem de polímeros

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Daiane Romanzini

FELIZ  
2021

NATÁLIA DEWES NIENOV

**Estudo de reciclagem química por pirólise dos polímeros polietileno e polipropileno pelo procedimento de revisão sistemática e análise bibliométrica**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Matheus Felipe Pedrotti

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Niceia Chies da Fre

**ORIENTADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Daiane Romanzini

Feliz, 02 de setembro de 2021.

## RESUMO

Os polímeros são materiais amplamente utilizados pela sociedade e suas aplicações já perpassam diversas áreas. No entanto, como os polímeros não se degradam rapidamente no ambiente a reciclagem é um ponto importante. A reciclagem mecânica é o método mais utilizado e é composta por várias etapas que transformam o polímero pós-consumo em um material com característica de polímero reciclado, mas que pode ser usado como matéria-prima na produção de polímeros e outros produtos. No entanto, vários estudos estão em andamento sobre outro tipo de reciclagem, a reciclagem química. A reciclagem química engloba processos que convertem os materiais poliméricos em moléculas menores e que são adequados para a produção de novos produtos petroquímicos e polímeros. Tendo como base uma metodologia de revisão sistemática e análise bibliométrica o trabalho se propôs a extrair dados e informações da base de dados *Web of Science* e SciELO acerca do tema, de modo a identificar as atuais tecnologias que estão sendo estudadas com foco na reciclagem química de polietileno e polipropileno. Pode-se verificar, a partir do estudo, que a pirólise tem um bom potencial para converter resíduos de polímeros em produtos como óleo, gás e carvão líquido, e energia, sendo uma boa solução para reciclagem química de polietileno e polipropileno. Por fim, como forma de exemplificar o processo de pirólise se buscou na literatura exemplos de *layouts* de esquemas de planta piloto de reciclagem química via pirólise.

**Palavras-chave:** Polímeros, reciclagem química, pirólise, revisão sistemática, análise bibliométrica.

## **ABSTRACT**

Polymers are materials widely used by society and their applications already permeate several areas. However, as polymers do not degrade quickly in the environment, recycling is an important point. Mechanical recycling is the most used method and consists of several steps that transform the post-consumer polymer into a material with the characteristic of recycled polymer, but which can be used as a raw material in the production of polymers and other products. However, several studies are underway about another type of recycling, chemical recycling. Chemical recycling encompasses processes that convert polymeric materials into smaller molecules and that are suitable for the production of new petrochemicals and polymers. Based on a methodology of systematic review and bibliometric analysis, the work proposed to extract data and information from the Web of Science and SciELO database on the subject, in order to identify the current technologies that are being studied with a focus on chemical recycling of polyethylene and polypropylene. It can be seen from the study that pyrolysis has a good potential to convert polymer residues into products such as oil, gas and liquid coal, and energy, being a good solution for chemical recycling of polyethylene and polypropylene. Finally, as a way to exemplify the pyrolysis process, examples of layouts of pilot plant schemes for chemical recycling via pyrolysis were searched in the literature.

**Keywords:** Polymers, chemical recycling, pyrolysis, systematic review, bibliometric analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da reação de polimerização por adição.....	13
Figura 2: Esquema da reação de polimerização por condensação.....	13
Figura 3: Estrutura química da unidade repetitiva do polietileno. ....	13
Figura 4: Estrutura química da unidade repetitiva do polipropileno. ....	15
Figura 5: Gráfico das principais resinas consumidas no Brasil em %. ....	16
Figura 6: Exemplo de fluxograma de processo de reciclagem mecânica.....	19
Figura 7: Símbolos de identificação de resinas plásticas. ....	20
Figura 8: Fases e regiões de um reator de leito fluidizado. ....	26
Figura 9: Gráfico de quantidade de publicações por ano. ....	37
Figura 10: Diagrama esquemático do aparato de processo de pirólise.....	45
Figura 11: Esquema de processo de pirólise. ....	46
Figura 12: Esquema de pirólise. ....	46
Figura 13: Esquema de pirólise. ....	47
Figura 14: Esquema de planta piloto de pirólise. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo de características do PEAD e PEBD. ....	14
Tabela 2: <i>Checklist</i> de revisão sistemática e análise bibliométrica. ....	30
Tabela 3: <i>Checklist</i> de revisão sistemática e análise bibliométrica. ....	32
Tabela 4: Pesquisas realizadas na <i>Web of Science</i> e <i>SciELO Citation Index</i> . ....	33
Tabela 5: Resultados obtidos nas pesquisas realizadas na <i>Web of Science</i> . ....	35
Tabela 6: Resultados obtidos nas pesquisas realizadas na <i>SciELO Citation Index</i> . ....	35
Tabela 7: Resultados obtidos. ....	36

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>10</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	10
1.1.2 Objetivos específicos .....	10
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Polímeros.....</b>	<b>12</b>
2.1.1 Polietileno (PE).....	13
2.1.2 Polipropileno (PP) .....	15
<b>2.2 Reciclagem de Polímeros .....</b>	<b>16</b>
2.2.1 Reciclagem mecânica .....	18
2.2.2 Reciclagem química.....	21
2.2.3 Pirólise .....	22
2.2.3.1 Reator de leito fluidizado utilizado em pirólise .....	25
2.2.4 Comparativo entre Reciclagem mecânica e química.....	27
<b>2.3 Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica .....</b>	<b>28</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Exemplos de esquemas de planta piloto de reciclagem química a partir de revisão bibliográfica .....</b>	<b>34</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Exemplos de esquemas de planta piloto de reciclagem química a partir de revisão bibliográfica .....</b>	<b>45</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A indústria química transforma as substâncias da natureza em substâncias com as características desejadas, através de processos industriais (GAUTO e ROSA, 2011). Um exemplo de indústria química é a indústria polimérica.

Os polímeros possuem diversas propriedades que possibilitam seu uso em diversas demandas como: durabilidade que permite grande potencial de recuperação; leveza que possibilita menor consumo de combustível pelos veículos, segurança para aplicações médico-hospitalares e possibilidade de diversas fontes de insumo (ABIPLAST, 2019). Assim, de acordo com o Perfil 2019 da Abiplast, a indústria de polimérica no Brasil, em 2018, produziu 8,3 milhões de toneladas de resinas termoplásticas e 7,2 milhões de toneladas de transformados convertidos em produtos (ABIPLAST, 2019).

Um fator importante para a indústria polimérica é a processabilidade, pois determina qual o método de produção é aplicável para polímeros, como polietileno (PE) e polipropileno (PP). Diferentes níveis de processabilidade possibilitam diferentes aplicações dos polímeros, resultando em diferentes processos e produtos (ERIKSEN *et al.*, 2019). Os processos variaram bastante para diversos tipos de embalagens de PE e PP, principalmente para o último, além dos produtos mistos como, polímero/metalo. No entanto, a reciclagem atual de resíduos misturados e separados de PP não facilitará a reciclagem de novos produtos desse polímero, produzidos a partir das novas tecnologias (ERIKSEN *et al.*, 2019). Portanto, a homogeneidade desses resíduos quando enviados ao reprocessamento, através de uma separação e triagem eficazes, é um fator muito importante (ERIKSEN *et al.*, 2019).

Nesse contexto, os métodos atuais de recuperação incluem reciclagem mecânica, reciclagem química de solventes, pirólise e gaseificação. Entre esses métodos, a reciclagem mecânica e a química por pirólise são as mais amplamente praticadas (YUGUE, 2020). Maier e Calafut (1998) ressaltam que se os materiais usados na reciclagem mecânica não forem separados, as diferentes propriedades dos polímeros misturados podem ter um efeito adverso, resultando, assim, em produtos reciclados de baixa qualidade, limitando suas aplicações. Além disso, as práticas atuais de reciclagem envolvem o reprocessamento de resíduos mistos de PET (poli (tereftalato de etileno)), PE e PP (ERIKSEN *et al.*, 2019).

Entretanto, apesar da reciclagem mecânica ainda ser o mecanismo de reciclagem mais disseminado no Brasil para transformar os resíduos (pós-industriais ou pós-consumo) em novos produtos, ela tem suas limitações e não permite o tratamento de todos os tipos de

materiais, o que mostra a necessidade do estudo de alternativas distintas de reciclagem (AVELINO, 2020).

Uma das alternativas a reciclagem mecânica é a reciclagem química, que reprocessa o material, recuperando os componentes do polímero e transforma-o em um petroquímico básico que pode ser utilizado como matéria-prima em refinarias (AVELINO, 2020).

Para se conhecer a atual situação da reciclagem química e quais estudos estão sendo publicados, se utiliza a pesquisa bibliográfica. No entanto, a quantidade de publicações que podem aparecer sobre o assunto oferecem vários desafios na coleta, seleção e análise de publicações (MEDEIROS *et al.*, 2015). Todavia, existem procedimentos de pesquisa que possuem protocolos e indicadores que possibilitam a seleção e tratamento de dados pertinentes conhecidos como revisão sistemática e análise bibliométrica (MEDEIROS *et al.*, 2015).

Logo após a apresentação dos objetivos, a estrutura do trabalho envolverá primeiramente uma incursão teórica acerca dos assuntos abordados para o estudo. A metodologia, bem como os resultados que serão apresentados na sequência, e por fim, será apresentada a conclusão e as referências utilizadas.

## 1.1 Objetivos

A seguir serão apresentados o objetivo geral e os específicos que contêm a ideia central do trabalho e os meios necessários para a obtenção deste.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar, pela técnica de revisão sistemática e análise bibliométrica, a reciclagem química de polietileno e polipropileno e verificar exemplos de *layouts* de esquemas de planta piloto de reciclagem química via pirólise em estudos da literatura.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar, a partir dos principais estudos que estão sendo realizados atualmente, as tecnologias utilizadas em reciclagem química de polímeros polietileno e polipropileno por meio da técnica de revisão sistemática e análise bibliométrica;

- Escolher o tipo de reator mais adequado para reciclagem química de polietileno e polipropileno, a partir da análise dos resultados obtidos pela técnica de revisão sistemática e análise bibliométrica;
- Pesquisar na literatura exemplos de *layouts* de esquemas de planta piloto de reciclagem química via pirólise.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura foi realizada subdividida em tópicos: polímeros, tipos de polímeros, reciclagem mecânica e química de polímeros, reciclagem química pelo processo de pirólise, revisão sistemática e análise bibliométrica.

### 2.1 Polímeros

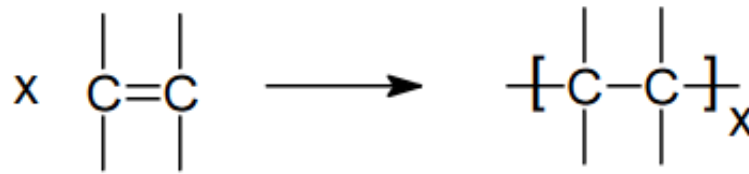
Polímeros são “macromoléculas formadas pela repetição de muitas unidades químicas iguais, os *meros* ou unidades repetitivas” (DE PAOLI, 2008). Os conceitos de macromolécula e polímero podem ser confundidos. De acordo com Akcelrud (2007), a alta massa molar dos polímeros é proveniente da repetição de unidades estruturais simples, e nas macromoléculas a alta massa molecular é consequência da complexidade molecular. Entretanto, Gauto e Rosa (2011) alegam que o peso molecular elevado das macromoléculas pode ser resultante tanto da complexidade da molécula quanto da existência de unidades constitucionais repetitivas.

As unidades de repetição que formam os polímeros são unidas por ligações primárias fortes chamadas intramoleculares, “pois dizem respeito às ligações dentro de uma mesma molécula, normalmente do tipo covalente” (CANEVAROLO Jr, 2013). No entanto, os segmentos ou ramificações da cadeia principal se atraem pelas forças intermoleculares, ou seja, ligações secundárias fracas.

As ligações intramoleculares fortes e covalentes juntamente com o arranjo dos meros determinam a estrutura química, o tipo de cadeia e a configuração polimérica; a influência da cadeia na rigidez e flexibilidade do polímero; e a estabilidade térmica, fotoquímica e química do polímero. Já as forças intermoleculares fracas vão definir: “a temperatura de fusão cristalina, solubilidade, cristalinidade, difusão, permeabilidade a gases e vapores, deformação e escoamento” (CANEVAROLO Jr, 2013).

Os polímeros são resultantes de reações de polimerização, podendo ser de adição ou por etapas (ou condensação). No caso da polimerização por adição, “um monômero A reage com o monômero A; sucessivamente, adicionam-se um ao outro, como mero, para formar as macromoléculas” (BRETAS e ÁVILA, 2010). Assim, durante a polimerização na presença de catalisador, aquecimento e aumento de pressão, ocorre à ruptura da ligação dupla e a formação de ligação simples, como mostrado na Figura 1. São formados pela polimerização por adição os polímeros: polietileno, polipropileno, poli (cloreto de vinila) (PVC), entre outros (CANEVAROLO Jr, 2013).

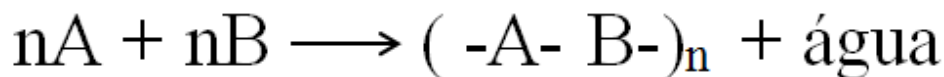
Figura 1: Esquema da reação de polimerização por adição.



Fonte: Fernandes e Lona (2004).

Gauto e Rosa (2011) e De Paoli (2008) explicam que a polimerização por condensação ocorre pela reação entre dois monômeros diferentes, e a geração ou não de subprodutos de baixa massa molar, por exemplo, água, conforme pode ser observado na Figura 2. Um exemplo dessa polimerização é a obtenção do PET.

Figura 2: Esquema da reação de polimerização por condensação.



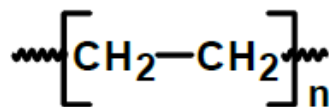
Fonte: Gauto e Rosa (2011).

Os polímeros são caracterizados de acordo com a sua natureza, naturais ou sintéticos. Os primeiros são os polímeros presentes em seres vivos como proteínas, carboidratos. Enquanto que os polímeros sintéticos são aqueles produzidos pela indústria petroquímica, polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), PP, PVC, resinas, elastômeros, entre outros (GAUTO e ROSA, 2011).

### 2.1.1 Polietileno (PE)

O PE tem sua cadeia principal formada por ligações covalentes de carbono-carbono (C-C), um exemplo de ligação primária forte. O PE é obtido pela reação de adição em cadeia entre as moléculas do eteno, formando o mero apresentado no Figura 3, sendo um polímero que possui “alta resistência à umidade e ataque químico, boa flexibilidade e baixa resistência mecânica” (GAUTO e ROSA, 2011).

Figura 3: Estrutura química da unidade repetitiva do polietileno.



Fonte: De Paoli (2008).

Os polímeros são classificados devido à estrutura química do mero. O polietileno é classificado como poliolefina, polímero de cadeia carbônica, pois é “originário de monômero de hidrocarboneto alifático insaturado contendo uma dupla ligação carbono-carbono reativa” (CANEVAROLO Jr, 2013).

O polietileno pode ser dividido em outros componentes, dependendo das características químicas presentes, como: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno linear de baixa densidade (PELBD), em inglês, as siglas são, respectivamente, HDPE, LDPE e LLDPE. Uma diferença entre PEBD e PEAD é que o primeiro “possui uma cadeia ramificada aleatória, enquanto que o de alta tem uma cadeia linear” (CANEVAROLO Jr, 2013). A cadeia linear possui somente uma cadeia principal, enquanto que na ramificada, há segmentos prolongados a partir da principal. Os segmentos podem possuir os mesmos meros da cadeia principal ou outros distintos. A diferença na configuração da cadeia implica em diferenças nas características de cada um, alterando a densidade, temperatura de fusão, resistência à tração e ruptura (CANEVAROLO Jr, 2013), conforme mostra a Tabela 1, que apresenta a diferença de densidade e temperatura de fusão do PEAD e PEBD.

Tabela 1: Comparativo de características do PEAD e PEBD.

	Polietileno de Alta densidade (PEAD)	Polietileno de Baixa densidade (PEBD)
Tipo de cadeia	Linear	Ramificada
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,95 ~ 0,96	0,92 ~ 0,93
Temperatura de fusão (°C)	135	110

Fonte: Adaptado de Canevarolo Jr (2013).

Gauto e Rosa (2011) afirmam que, devido a sua estrutura, o PEAD é um material rígido, com alta cristalinidade, e que possibilita uma grande interação intermolecular. Enquanto que as cadeias ramificadas do PEBD “produzem um material macio, bastante flexível e com baixa cristalinidade” (GAUTO e ROSA, 2011).

No entanto, o PELBD, de acordo com Canevarolo Jr (2013), é caracterizado como um copolímero aleatório e possui ramificações curtas. Assim, suas características diferem de outros polietilenos, apresentando densidade intermediária, variando de 0,926g/cm<sup>3</sup> a 0,94g/cm<sup>3</sup> (CANEVAROLO Jr, 2013).

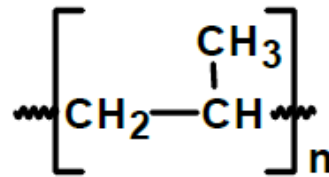
O PE é um dos plásticos mais populares do mundo, sendo um polímero versátil, com diversas aplicações na produção de vários utensílios. Por exemplo, o PEBD é utilizado para a

fabricação de bandejas, filmes, sacos e embalagens longa-vida; já o PEAD é utilizado na produção de garrafas, sacos de lixo e embalagens para os mais diversos produtos (JÚNIOR, 2017).

### 2.1.2 Polipropileno (PP)

O PP é “obtido pela adição sucessiva do propeno” (GAUTO e ROSA, 2011), sendo uma resina termoplástica produzida a partir do propileno (DA SILVA, 2010). A Figura 4 apresenta a unidade repetitiva do PP. Esse polímero é classificado como uma poliolefina com baixa densidade, alta cristalinidade, possui uma boa resistência química e térmica (GAUTO e ROSA, 2011), oferecendo um “bom equilíbrio de propriedades térmicas, químicas e elétricas” (DA SILVA, 2010).

Figura 4: Estrutura química da unidade repetitiva do polipropileno.



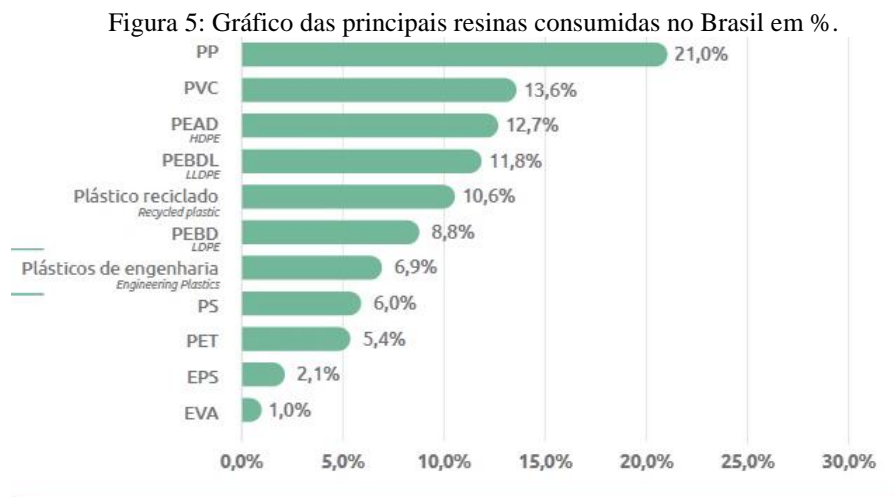
Fonte: De Paoli (2008).

O polipropileno é mais difícil de termoformar comparado a outras poliolefinas. Maier e Calafut (1998) descrevem que isso ocorre devido ao seu acentuado ponto de fusão e baixa resistência à fusão. O PP apresenta a habilidade de substituir vários materiais convencionais, como metal, madeira e vidro. Além disso, pode substituir outros termoplásticos devido a um custo relativamente menor (JÚNIOR, 2017).

O PE e PP pertencem aos polímeros termoplásticos, ou seja, quando há um “aumento substancial de temperatura e marginal de pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições” (CANEVAROLO Jr, 2013). Portanto, quando se retira o excesso de pressão e temperatura, se solidificam e assumem a forma desejada. Assim, quando aplicadas novas temperaturas e pressões é reiniciado o processo, e, deste modo esses polímeros são considerados recicláveis, de acordo com Canevarolo Jr (2013). Gauto e Rosa (2011) complementam que como o formato do polímero pode ser modificado por aquecimento, ele está sujeito a um grau de degradação química, limitando-o a uma quantidade de reciclagens, sendo o caso do PP.

Devido a essas características os polímeros mais consumidos no Brasil são termoplásticos e também são os mais encontrados nos resíduos sólidos urbanos (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005). Júnior (2017) destaca que os cinco principais tipos de plástico utilizados são poliolefinas (PP e PE), o PVC, o PS (poliestireno) e o PET, elas respondem por mais de 70% da demanda mundial de plásticos. Já Geyer, Jambeck e Law (2017) elaboraram um estudo que identificou que os plásticos mais produzidos são PE (36%), PP (21%) e PVC (12%).

A Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) elaborou em 2019 um Perfil da indústria e dos plásticos no Brasil, e no documento são apresentados diversos levantamentos, por exemplo, as resinas mais consumidas no Brasil em porcentagem, como mostra a Figura 5. Confirmando as afirmações de outros autores sobre os tipos de polímeros mais utilizados.



Fonte: ABIPLAST (2019).

## 2.2 Reciclagem de Polímeros

Spinacé e DePaoli (2005) expõem dados de 2000 da Plastivida e ABIQUIM, no qual o índice médio de reciclagem no Brasil era de 17,5%, e no estado do Rio Grande do Sul a taxa era 27,6%, e os polímeros PE e PP sendo os mais reciclados por empresas recicladoras (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005). Além disso, Faria e Pacheco (2009) cita que os principais plásticos descartados são: 36% PE, 21% PET, 13% PVC, 10% PP e 20% outros.

Já Geyer, Jambeck e Law (2017) apresentam dados de 2014, no qual, as maiores taxas de reciclagem foram na Europa, com 30%, e na China, com 25%, já nos Estados Unidos e em outros 52 países, a reciclagem de plástico permaneceu estável em 9%.



Segundo ABIPLAST (2019) o volume de resina plástica pós-consumo produzido no Brasil em 2018 foi de 757,6 mil toneladas, a geração de resíduo plástico pós-consumo foi de 3,4 milhões de toneladas e o índice de reciclagem foi de 22,1%. Os maiores consumidores de plástico reciclado correspondem ao mercado de higiene pessoal e limpeza doméstica (18%), construção civil (13,3%), bebidas (10%), vestuário/têxtil (9,1%), seguido das indústrias de automóveis, de agricultura, de brinquedos, de eletrodomésticos, de eletroeletrônicos e calçados (ABIPLAST, 2019).

A reciclagem pode ser definida como um “processo de transformação de materiais, previamente separados, de forma a possibilitar a sua recuperação, [...] podendo ser rejeitos de processo industrial ou produtos pós-consumo” (PIVA e WIEBECK, 2004). Lontra (2011) afirma que estudos baseados em Análise do Ciclo de Vida já demonstraram que as quantidades de energia gastas para obter um produto com matéria-prima virgem são maiores do que produzi-lo a partir da reciclagem.

Assim, a reciclagem é considerada uma solução viável a ser adotada, pois promove benefícios ambientais, financeiros e sociais, podendo-se citar: redução da quantidade de resíduos destinados aos aterros; geração de emprego e renda; diminuição da poluição do ar e das águas; e economia de matéria-prima (petróleo) equivalente à quantidade reciclada (FARIA e PACHECO, 2009).

Spinacé e DePaoli (2005) citam quatro condições básicas para o sucesso da reciclagem: contínuo fornecimento de material bruto, tecnologia de conversão adequada, mercado para o produto reciclado e viabilidade econômica. Outra questão importante apresentada por Forlin e Faria (2002) é quanto menor o número de componentes poliméricos e a complexidade de uma embalagem plástica, maior o seu valor de reciclagem, pois poderá haver a diminuição das etapas e recursos tecnológicos empregados no processo. Assim, a reciclabilidade de embalagens plásticas está relacionada com a viabilidade econômica de implementação de determinadas rotas de reciclagem (FORLIN e FARIA, 2002).

A reciclagem de polímeros, de acordo com Spinacé e De Paoli (2005), é dividida em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária. No entanto podem ser chamadas por nomes específicos, por exemplo, primária e secundária como reciclagem mecânica, a terciária como química, e a quaternária como energética.

De acordo com Spinacé e De Paoli (2005), a reciclagem primária é a “conversão dos resíduos poliméricos industriais por métodos de processamento em produtos com características equivalentes aos polímeros virgens”, além disso, também apresentam desempenho equivalente (PIVA e WIEBECK, 2004). Define-se a secundária como “quando o

produto final possui característica, desempenho e propriedades mecânicas inferiores as comparadas com o produto obtido com a resina virgem, [...], e se aplica normalmente a resíduos pós-consumo” (PIVA e WIEBECK, 2004), sendo assim, um exemplo é a conversão dos resíduos sólidos urbanos (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005). No Brasil, a reciclagem de plásticos mais utilizada é a mecânica (LONTRA, 2011; PIVA e WIEBECK, 2004).

Já a reciclagem química é definida como “um processo tecnológico onde se realiza a conversão do resíduo plástico em matérias-primas petroquímicas básicas” (PIVA e WIEBECK, 2004). Spinacé e De Paoli (2005) complementam que a reciclagem terciária é um “processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir dos resíduos poliméricos” (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005).

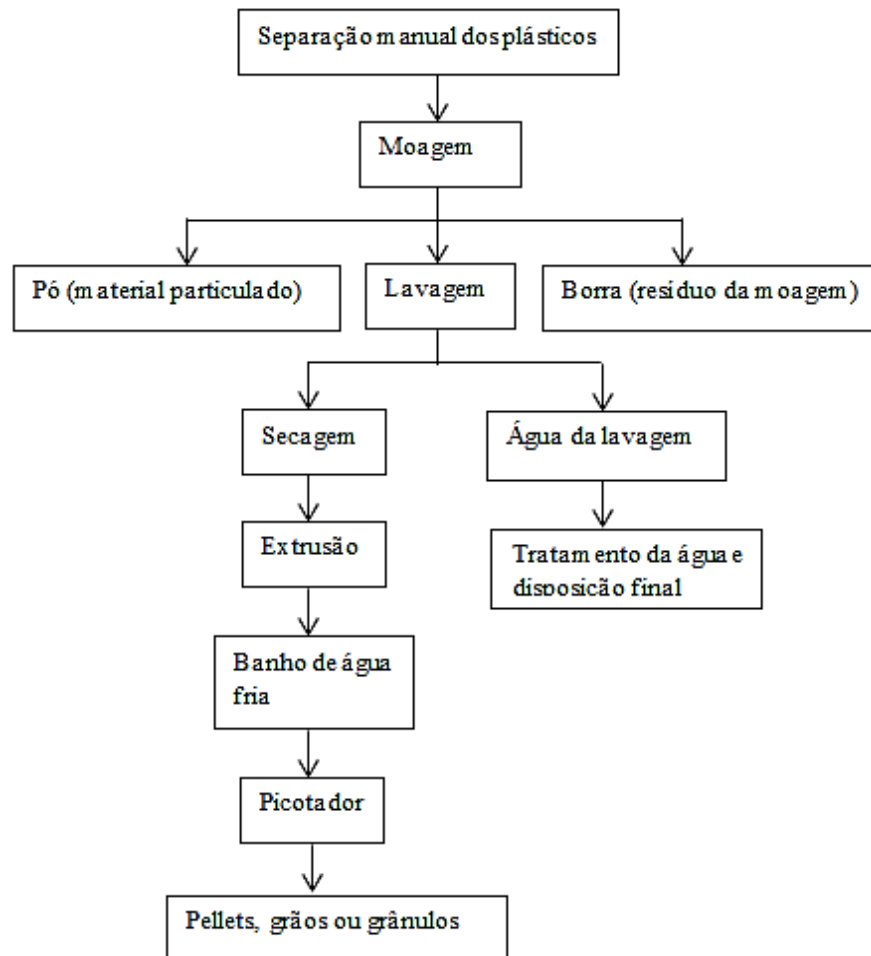
A reciclagem energética, de acordo com Piva e Wiebeck (2004), consiste na “compactação dos resíduos e subsequente queima, gerando energia, resíduos sólidos e gasosos”, sendo utilizada também pelo alto poder calorífico dos plásticos, considerados “combustíveis sintéticos” (PIVA e WIEBECK, 2004).

É importante ressaltar que durante a reciclagem algumas propriedades mecânicas podem ser reduzidas e alteradas, devido à “degradação termomecânica do polímero durante o processamento, degradação durante a vida útil, principalmente causado por processos de foto-oxidação e/ou contaminação dos resíduos de plástico” (ERIKSEN *et al.*, 2019).

### **2.2.1 Reciclagem mecânica**

A reciclagem mecânica consiste “na combinação de um ou mais processos operacionais para o reaproveitamento de material descartado, transformando-o em grânulos para a fabricação de outros produtos” (PIVA e WIEBECK, 2004). A Figura 6 apresenta a sequência de um possível fluxograma de reciclagem.

Figura 6: Exemplo de fluxograma de processo de reciclagem mecânica.

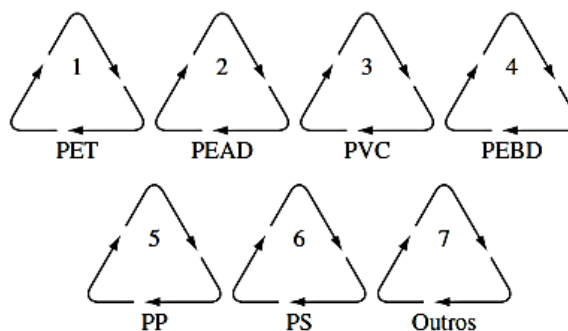


Fonte: Adaptado de PIVA e WIEBECK (2004).

De acordo com a Figura 6, a primeira etapa da reciclagem de um polímero é a separação dos materiais plásticos dos restantes, como papel, metal, papelão, entre outros. Após, é importante a separação dos diversos tipos de plásticos que normalmente ocorre de forma manual, em que se separam os materiais a partir da identificação e/ou do aspecto visual (LONTRA, 2011). Spinacé e De Paoli (2005) destacam a importância da etapa de separação, que pode ser feita através da simbologia impressa no produto e testes de identificação, como separação por diferença de densidade, odor dos vapores de queima, solubilidade, entre outros.

No Brasil, a Norma Brasileira ABNT NBR 13230:2008, denominada de Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e Simbologia - estabelece os símbolos para identificação das resinas plásticas (COLTRO; GASPARINO; QUEIROZ, 2008). Essa simbologia é impressa nos rótulos dos produtos e consiste em sinais de representação, no qual os códigos apresentam um número convencional para cada polímero reciclável e/ou o nome do polímero utilizado (PIVA e WIEBECK, 2004), conforme mostra a Figura 7.

Figura 7: Símbolos de identificação de resinas plásticas.



- 1 - PET - Polietileno tereftalato
- 2 - PEAD - Polietileno de alta densidade
- 3 - PVC - Policloreto de vinila
- 4 - PEBD - Polietileno de baixa densidade
- 5 - PP - Polipropileno
- 6 - PS - Poliestireno
- 7 - Outros

Fonte: Coltro, Gasparino e Queiroz (2008).

No caso do PELBD pode-se adotar o mesmo símbolo do PEBD, pois esses materiais são reciclados pelo mesmo processo, mas previamente separados (COLTRO; GASPARINO; QUEIROZ, 2008). Para resíduos que possuem estruturas laminadas ou multicamadas, a reciclagem se dará pela separação dos materiais constituintes e pelo número correspondente a resina com maior participação na composição (FORLIN e FARIA, 2002).

A moagem consiste em fragmentar o resíduo em partes menores. O material possível de ser reprocessado passa para a etapa de lavagem com água. Essa água utilizada no processo deve receber um tratamento para sua reutilização ou descarte (LONTRA, 2011). No fluxograma não é apresentada a etapa de aglutinação, pois em alguns processos não é empregada. Após a secagem do material, “o atrito dos fragmentos contra a parede do equipamento rotativo provoca elevação da temperatura, e conseqüente formação de uma massa plástica” (LONTRA, 2011). Na extrusão, a massa plástica se torna homogênea, e passando por cabeçote, sai em formato de espaguete. O mesmo é resfriado e segue por um picotador, transformando-o em *pellets* (LONTRA, 2011).

Dependendo do tipo e procedência do polímero a ser reciclado, algumas das etapas não são efetuadas ou possuem etapas específicas (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005). No caso dos resíduos pós-consumo, é necessário ter as etapas de lavagem e secagem, para se retirar quaisquer contaminantes e materiais que podem danificar os equipamentos (PIVA e WIEBECK, 2004). Enquanto que nos resíduos industriais, ou seja, materiais produzidos fora

das especificações, sobras de plásticos, troca de materiais, entre outros fatores, não são necessárias as etapas de lavagem e secagem (PIVA e WIEBECK, 2004).

Apesar da ampla utilização da reciclagem mecânica, algumas dificuldades são citadas por Avelino (2020), como: variações de preços dos materiais reciclados e virgens; variações térmicas e mecânicas ocorridas durante o processo; impurezas e má separação dos resíduos no início do processo, prejudicando o produto final; altos custos de energia elétrica na operação dos equipamentos; falta de apoio do governo por meio de incentivos à indústria da reciclagem; não possibilidade de reciclar mecanicamente materiais contaminados com alimentos ou outras substâncias.

### **2.2.2 Reciclagem química**

A reciclagem química é muito utilizada pela indústria na Europa e no Japão, enquanto que no Brasil ela ainda está em desenvolvimento (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005). Uma sequência simples dessa reciclagem é definida por Piva e Wiebeck (2004), no qual o resíduo plástico “é aquecido e hidrogenado para a obtenção de hidrocarbonetos, e desta reação resultam resíduos de destinação opcional a quem recicla, bem como gases e óleos, que são separados e enviados a refinarias para o seu reaproveitamento como matéria-prima ou utilizados como combustíveis” (PIVA e WIEBECK, 2004).

Júnior (2017) explica que na reciclagem química, os plásticos são usados como matéria-prima através de processos químicos, incluindo a despolimerização para a produção de monômero base ou de outros componentes úteis. A reciclagem química na maior parte das vezes tem como objetivo converter os plásticos em moléculas menores, usualmente na forma de líquidos ou gases, que podem ser usados para a produção de outros produtos químicos ou até mesmo plásticos (JÚNIOR, 2017).

Já Forlin e Faria (2002) descrevem que a reciclagem química compreende a despolimerização dos materiais plásticos, a recuperação e purificação dos monômeros originais, podendo, então, serem novamente polimerizados para a fabricação de novas embalagens plásticas primárias, ou de outros materiais. Os processos são complexos e de alto custo (AVELINO, 2020). Além disso, nos processos de reciclagem química em que o calor quebra as cadeias, formam-se geralmente muitos produtos diferentes, normalmente com alto teor combustível (YUGUE, 2020).

Conforme Yugue (2020), o resíduo plástico passa por um processo químico de despolimerização via solventes, no qual há quebra da cadeia polimérica, “inclusive da cadeia

principal, objetivando o retorno à matéria-prima inicial, quando poderão posteriormente serem re-polimerizados, originando resina virgem novamente” (YUGUE, 2020).

Portanto, a reciclagem química ocorre através de processos de despolimerização por solvólise, por métodos térmicos ou por métodos térmicos/catalíticos (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005). Spinacé e De Paoli (2005) citam exemplos dos processos: solvólise, que pode ocorrer por hidrólise, alcoólise ou amilose; os processos térmicos podem ser pirólise a baixa e alta temperatura, gaseificação ou hidrogenação; já os processos térmicos/catalíticos podem ser a pirólise e a utilização de catalisadores seletivos (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005). Para as poliolefinas os mais utilizados são os métodos térmicos/catalíticos (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005).

Os processos de solvólise são os processos de reciclagem química no qual os polímeros são despolimerizados na presença de glicol, metano e água até retornarem às moléculas dos petroquímicos que os originaram. Há emprego do calor no processo, porém em níveis pouco acima da temperatura de fusão do polímero (AVELINO, 2020).

Já a gaseificação é um processo no qual os resíduos sólidos são convertidos em um gás de síntese através de diversas reações químicas (AVELINO, 2020). De acordo com Avelino (2020), “o processo de hidrogenação é uma possibilidade coerente da quebra dos elementos do plástico, uma vez que possibilita a formação de produtos saturados, sem que haja a presença de partículas líquidas, favorecendo o uso sem a necessidade de mais tratamentos”. Esse processo possui um alto custo, devido ao hidrogênio necessitar de ambientes com alta pressão (AVELINO, 2020).

Em relação à pirólise, esta possui dois tipos: a despolimerização realizada a baixas temperaturas; e a degradação térmica que utiliza altas temperaturas (AVELINO, 2020).

Portanto, o processamento químico das resinas se mostra vantajoso pela possibilidade de eliminar etapas, como de separação e limpeza. No entanto, usualmente se emprega altas quantidades de energia, uma vez que a grande maioria dos processos de despolimerização ocorre por via térmica (JÚNIOR, 2017).

### **2.2.3 Pirólise**

A pirólise é o processo de ruptura da estrutura molecular original de um determinado material pela ação do calor em um ambiente sem oxigênio, podendo gerar uma combinação de óleo, gás e carvão em diferentes proporções, apenas pela variação de parâmetros operacionais, como temperatura ou taxa de aquecimento (YUGUE, 2020).

A pirólise é uma reação endotérmica, portanto é necessária a adição de calor, que pode ser fornecido diretamente ou indiretamente (troca de calor) (YUGUE, 2020). Resíduos que possuem altos teores de impurezas podem ser reciclados por pirólise. No entanto, podem ser gerados produtos de decomposição que são difíceis de separar e possuem valor comercial baixo comparado a produtos de outros processos (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005; YUGUE, 2020). Podem ser usados também catalisadores, por exemplo, zeólitas que aumentam o grau de conversão e a seletividade dos produtos obtidos (SPINACÉ e DE PAOLI, 2005).

O tratamento dos resíduos através da degradação térmica gera um produto de três fases: gasosa (composta por H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, entre outros), sólida (cinzas) e líquida (hidrocarbonetos aplicáveis na obtenção de energia) (AVELINO, 2020).

A pirólise é amplamente utilizada para reciclagem de poliolefinas e outros polímeros de adição (YUGUE, 2020), além disso, a pirólise é dita flexível na questão de mistura de materiais na alimentação do reator, pois se consegue evitar o custo da operação de separação e gerar produtos reciclados que podem ser usados como combustível ou outros produtos químicos de valor agregado (YUGUE, 2020).

A pirólise de materiais plásticos têm sido implementada com relativa eficiência em países com elevada densidade populacional, com restritas opções de fontes energéticas convencionais e geralmente economicamente desenvolvidos (FORLIN e FARIA, 2002). Yugue (2020) cita que uma das grandes vantagens da pirólise é a possibilidade de alimentar no reator diversos tipos de matérias-primas, incluindo resíduos industriais e domésticos, e que já foram desenvolvidos vários tipos de pirólise como: rápida, catalítica, lenta, “*flash*”, lento e vácuo (CZAJCZYNSKA *et al.*, 2017).

Júnior (2017) destaca que o processo de pirólise constitui uma rota de reciclagem química defendida por vários pesquisadores, uma vez que há possibilidade de obter rendimentos de até 80% massa/massa de produtos úteis em temperaturas entre 500 e 700 °C (JÚNIOR, 2017). Além disso, “o processo de pirólise em si é altamente flexível no que diz respeito aos parâmetros operacionais” (JÚNIOR, 2017), por exemplo, a variável temperatura.

A temperatura afeta a velocidade do craqueamento térmico do polímero e exerce um efeito forte sobre os produtos e reações secundárias. Júnior (2017) apresenta as análises termogravimétricas como um auxílio na identificação das temperaturas de início, fim e máxima taxa de degradação para diferentes tipos de polímeros, portanto é possível definir uma faixa de temperatura aplicável ao processo de pirólise.

Sendo assim, a temperatura influencia nos rendimentos dos produtos da pirólise, líquido e gás (JÚNIOR, 2017), entretanto, o rendimento de sólidos é praticamente constante

com o aumento da temperatura (JÚNIOR, 2017). O rendimento dos produtos gasosos é gerado pelo aumento da temperatura, devido a maior taxa de quebra das fortes ligações C-C (carbono-carbono) em altas temperaturas, originando hidrocarbonetos leves, de cadeias pequenas como, C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> (gás hidrogênio), CO (monóxido de carbono) e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono).

Czajczynska *et al.* (2017) complementa que a pirólise de plásticos produz gás pirolítico, composto de hidrocarbonetos leves como metano, etano, eteno, propano, propeno, butano e buteno. “Esses gases possuem poder calorífico semelhante ao do gás natural e, por isso, podem ser utilizados como recuperação energética para o processo” (JÚNIOR, 2017). Sendo possível utilizar o gás pirolítico como fonte de energia necessária ao processo de pirólise, e a combustão desse gás pode fornecer o aquecimento do reator (CZAJCZYNSKA *et al.*, 2017). No entanto, quando a composição dos resíduos alimentados no reator não é conhecida, devem-se empregar unidades de controle de emissão e dispositivos de gás de limpeza, pois pode ocorrer liberação de materiais indesejáveis, como SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) e HCl (ácido clorídrico) (CZAJCZYNSKA *et al.*, 2017).

Czajczynska *et al.* (2017) cita que os produtos da pirólise costumam ter boas propriedades como combustível, sendo possível a recuperação de energia e comercialização da mesma, além disso, parte dos produtos pode ser queimada para atender à demanda de energia da pirólise.

Já no produto líquido há a presença de hidrocarbonetos aromáticos, que devido a altas temperaturas quebram as cadeias poliméricas grandes, gerando fragmentos de radicais livres que se combinam formando olefinas e, posteriormente, se combinam em estruturas cíclicas que são desidrogenadas em produtos insaturados ou em aromáticos (JÚNIOR, 2017). Essa fração líquida, também chamada de óleo de pirólise, apresenta elevado poder calorífico, semelhante ao de combustíveis líquidos convencionais representando uma alternativa energética interessante, sendo possível de ser utilizado em fornos, caldeiras, turbinas e motores diesel (JÚNIOR, 2017).

Apesar das condições do processo de pirólise priorizar os produtos líquidos e gasosos, ocorre a produção de sólido, denominado carvão pirolítico (CZAJCZYNSKA *et al.*, 2017). Esse carvão possui uma matriz rica em carbono contendo os compostos inorgânicos presentes nos resíduos e subprodutos condensados durante o processo de pirólise, e após caracterizá-lo pode ser queimado para obter energia para o próprio processo de pirólise ou outros fins (CZAJCZYNSKA *et al.*, 2017).



Por conseguinte, outros fatores também influenciam nos rendimentos dos produtos da pirólise, como: a vazão de gás inerte utilizada, tempo de reação, a taxa de aquecimento, o tamanho de partículas do polímero e o tipo de reator (JÚNIOR, 2017).

Júnior (2017) elaborou um modelo quantitativo de degradação pirolítica para os cinco principais resíduos plásticos descartados no Brasil: PP, PS, PET, PVC e PE, no qual seria possível prever a fração de hidrocarbonetos líquidos processáveis a partir de determinada massa ou volume de plásticos, assim como estimar os produtos resultantes do processo, servindo como uma ferramenta de projeto e futuramente permitindo a utilização de misturas de plásticos em processos similares aos usados para o refino de petróleo (JÚNIOR, 2017). Os ensaios de pirólise do autor foram realizados em um reator tubular de quartzo.

### 2.2.3.1 Reator de leito fluidizado utilizado em pirólise

O reator de leito fluidizado é caracterizado pela alta taxa de aquecimento, boa transferência de calor e boa mistura da matéria-prima a ser processada (YUGUE, 2020). O processo de leito fluidizado oferece três vantagens sobre outras tecnologias: maior transferência de calor, habilidade de movimentar sólidos como um fluido e processar materiais com uma ampla distribuição granulométrica (CAMARGO; CARVALHO; BAPTISTA, 2015).

A técnica de leito fluidizado consiste na introdução de um fluxo gasoso na direção vertical e no sentido ascendente, atravessando um leito composto por material granulado inerte, geralmente sendo areia ou alumina. A matéria-prima processada é incorporada ao leito, recebendo assim, a energia necessária para a sua decomposição térmica, além disso, proporciona grande movimentação interna na região de fluidização, homogeneizando a temperatura em seu interior e permitindo o surgimento de pirólise, para melhorar sensivelmente a qualidade dos produtos obtidos (GOULART; MARIOTONI; SÀNCHEZ, 1999).

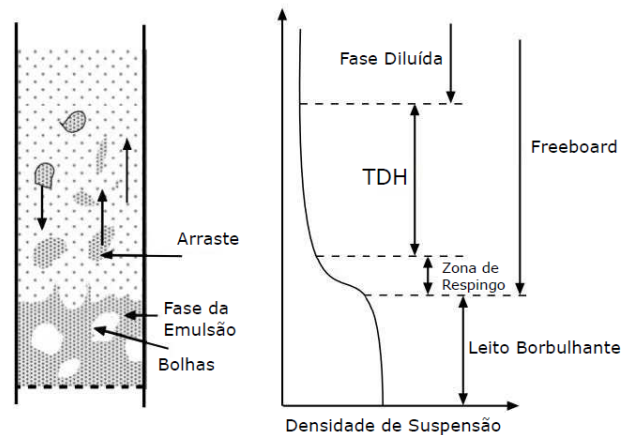
De acordo com Perondi (2013), um dos parâmetros elementares na técnica de leito fluidizado é a velocidade mínima de fluidização, que é a menor velocidade de gás necessária para que ocorra a fluidização das partículas presentes no leito. À medida que a partícula sobe no leito, ocorre uma queda na velocidade da partícula, que faz com que ela retorne ao leito e produza um movimento de recirculação (BARROS e BORGES, 2017).

Em um reator de leito fluidizado podem existir duas fases (Figura 8): uma fase emulsão-bolha e uma fase de escoamento livre (*freeboard*). A fase emulsão-bolha apresenta

uma superfície parcialmente definida e, a *freeboard* é dispersa, apresentando uma densidade de sólidos que decrescem com a altura. A altura da secção do reator entre a superfície superior da fase de emulsão-bolha e a saída do fluxo de gases é chamada de altura de *freeboard* ( $H_f$ ) (BARROS e BORGES, 2017; VILLABLANCA, 2016). Em alturas pequenas de  $H_f$  muitas das partículas grandes são arrastadas pelo gás, o que não ocorre se o  $H_f$  for maior (VILLABLANCA, 2016).

Outra zona importante é denominada *transport disengaging height* (TDH). Nessa região, somente as partículas com dimensões inferiores as partículas do leito conseguem ser carregadas (BARROS e BORGES, 2017).

Figura 8: Fases e regiões de um reator de leito fluidizado.



Fonte: Barros e Borges (2017).

Para compreender melhor os tipos de fluidização existentes é necessário conhecer as partículas, que são classificadas pelo tamanho. Uma classificação existente e muito utilizada é a de Geldart, que categorizou as partículas em grupos: A, B, C e D (GONÇALVES, 2017):

As partículas do grupo Geldart A apresentam as seguintes características: diâmetro de partícula ( $d_p$ ) e a densidade de partícula ( $\rho_p$ ) são pequenos; velocidade mínima de borbulhamento ( $u_{mb}$ ) é significativamente maior do que a velocidade mínima de fluidização ( $u_{mf}$ ); a expansão do leito antes do início do borbulhamento é grande; a mistura entre o gás e as partículas na fase de emulsão é grande; o tamanho das bolhas é reduzido (GONÇALVES, 2017).

Já as partículas do grupo Geldart B apresentam:  $u_{mb}$  e  $u_{mf}$  são quase idênticas; o refluxo de gás na fase de emulsão é menor; o tamanho das bolhas é quase independente do diâmetro médio da partícula;  $d_p$  em torno de 100-1000  $\mu\text{m}$  (GONÇALVES, 2017).

As partículas do grupo Geldart C: são difíceis de fluidizar e a formação de caminhos preferenciais ocorre; as forças entre partículas afetam muito o comportamento de fluidização; a compactação mecânica em pó, antes da fluidização, afeta o comportamento de fluidização;  $d_p$  em torno de 0-30  $\mu\text{m}$  (GONÇALVES, 2017).

Por fim, as partículas do grupo D são descritas como: partículas muito grandes ou muito densas; as bolhas têm grandes dimensões e sobem mais lentamente do que o resto do gás que perpassa através da emulsão;  $d_p$  maior que 1000  $\mu\text{m}$  (GONÇALVES, 2017).

As partículas mais comuns utilizadas em reatores de leito fluidizado são as partículas Geldart A e B, devido ao seu tamanho intermédio de partícula (GONÇALVES, 2017).

#### **2.2.4 Comparativo entre Reciclagem mecânica e química**

Júnior (2017) destaca que apesar da reciclagem mecânica ser uma alternativa válida em muitos casos, ela pode ser uma opção custosa e limitada, pois alguns polímeros são incompatíveis, além de haver a degradação parcial dos materiais. Outro ponto levantado pelo autor é a separação eficiente dos diversos tipos de plásticos, pois isso influencia no processo de reciclagem, uma vez que diferentes métodos de coleta rendem diferentes graus de pureza para os materiais coletados e tem custos diferentes (JÚNIOR, 2017), além de ser essencial para que as resinas recicladas sejam capazes de competir ou complementar o uso de resinas virgens (JÚNIOR, 2017).

Yugue (2020) destaca que quando não há condições para separação dos diferentes materiais poliméricos da mistura de plásticos para serem reciclados mecanicamente, as alternativas seriam a reciclagem química ou recuperação energética ou em último caso, dependendo do nível de contaminação com sujidade e mistura com outros materiais, a alternativa seria destiná-los ao aterro sanitário. A reciclagem mecânica de vários tipos de plásticos não é impossível, mas fica cada vez mais difícil quanto maior a disparidade química dos polímeros envolvidos (YUGUE, 2020).

Sendo assim, Júnior (2017) explica que “a reciclagem química se enquadra bem nos princípios de desenvolvimento sustentável, uma vez que esta classe de técnicas visa o retorno dos materiais descartados à cadeia química dos seus compostos de origem”.

Júnior (2017) destaca que comparada à reciclagem secundária, a pirólise não utiliza água na etapa de lavagem, pois é uma etapa não existente. Além disso, os gases gerados durante o processo apresentam um considerável valor calorífico, podendo ser aplicados para compensar parcialmente a demanda energética do processo em si (JÚNIOR, 2017).

Avelino (2020) sistematizou a bibliografia referente à reciclagem química e mecânica detalhando as etapas dos processos, identificando possíveis oportunidades de melhoria. O autor estudou o processo de gaseificação, suas vantagens e desvantagens, a influência de diversos fatores nos resultados, e verificou na literatura outros trabalhos desenvolvidos utilizando esse tipo de processo.

### 2.3 Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica

Para resolver os problemas comuns da pesquisa bibliográfica, como, quantidade elevada de publicações que aparecem sobre o assunto pesquisado e que podem oferecer vários desafios na coleta, seleção e análise de publicações, foram desenvolvidos procedimentos mais criteriosos e que possibilitam mais confiabilidade à pesquisa, denominado revisão sistemática (MEDEIROS *et al.*, 2015). Esse procedimento aplica métodos explícitos e sistematizados de busca, apreciação crítica e síntese da informação selecionada, no qual são definidas estratégias de busca de estudos científicos (MEDEIROS *et al.*, 2015).

Diante das publicações encontradas pela revisão sistemática, aplica-se a bibliometria, que, de maneira quantitativa, “avalia a relevância das publicações selecionadas através de indicadores e norteia o processo de seleção do referencial bibliográfico que melhor se aproxime do interesse do assunto pesquisado” (MEDEIROS *et al.*, 2015).

Medeiros *et al.* (2015) complementa que a análise bibliométrica ou bibliometria é um tratamento dos dados oriundos da revisão sistemática, ocorrendo a quebra desses dados em seus componentes fundamentais, chamados de indicadores bibliométricos. Esses podem ser entendidos como unidades de medida para o tratamento de dados da revisão sistemática (MEDEIROS *et al.*, 2015). Em termos de indicadores bibliométricos, citam-se os de peso do artigo, do periódico, do evento, dos autores, etc (MEDEIROS *et al.*, 2015).

A bibliometria está sendo utilizada como um método de análise quantitativa para pesquisa científica (SOARES *et al.*, 2016). Os dados obtidos por estudos bibliométricos quantificam a contribuição das publicações científicas de um autor ou instituição de ensino em diversas áreas (RIBEIRO, 2017), representando as tendências de pesquisas que estão sendo realizadas, e sendo possível elaborar previsões e decisões (SOARES *et al.*, 2016; RIBEIRO, 2017). Medeiros *et al.* (2015) complementa que a bibliometria oferece informações sobre os resultados do processo de investigação, o seu volume, evolução, visibilidade e estrutura, através de uma análise quantitativa de características bibliográficas de um conjunto de publicações.

Soares *et al.* (2016) destaca que indicadores de produções científicas estão ganhando importância crescente pois é um “instrumento para análise da atividade científica, em função de sua relação com o desenvolvimento econômica e social” (SOARES *et al.*, 2016), sendo uma ferramenta importante no contexto de investigar, mapear, explorar e analisar diversos temas acadêmicos (RIBEIRO, 2017). A análise se baseia em uma contagem de artigos científicos, patentes e citações em um repositório de dados (SOARES *et al.*, 2016) e/ou periódicos acadêmicos pré-selecionados (RIBEIRO, 2017). Os repositórios ou base de dados são locais que armazenam periódicos de acordo com características e regras próprias. Por exemplo, *Web of Science* e SciELO.

A *Web of Science* (WoS) é uma base multidisciplinar desenvolvida pela *Thomson Scientific – Institute for Science Information* (ISI). Ela é uma fonte de dados bibliográficos que permite avaliar a relação entre autores, instituições, estados, áreas do conhecimento e países dos artigos selecionados. (SOARES *et al.*, 2016). A *Web of Science* é o banco de dados de citações global independente mais confiável do mundo, fornecendo publicações e dados de citação para descoberta, acesso e avaliação confiáveis (CLARIVATE, 2021).

Outro repositório de dados é o SciELO (*Scientific Electronic Library Online*) *Citation Index*, que ajuda os pesquisadores a fazer conexões com o cenário de pesquisa mais amplo, possibilitando pesquisas em periódicos regionais na América Latina, Espanha, Portugal, Caribe e África do Sul (CLARIVATE, 2021). O SciELO é um programa da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo para a publicação cooperativa de periódicos em acesso aberto na internet (CLARIVATE, 2021).

De acordo com Clarivate (2021), quando as descobertas são influenciadas por pesquisas anteriores, tanto em sua área de assunto quanto em campos relacionados e também quando uma publicação pode ter influência e impacto significativo em outras pesquisas depois de publicada, as plataformas *Web of Science* e SciELO *Citation Index* se tornam importantes.

Medeiros *et al.* (2015) elaboraram um método de revisão sistemática e análise bibliométrica, além de fazer uso de uma técnica de representação visual para facilitar a compreensão do processo desenvolvido e dos procedimentos. O método elaborado pelos autores foi testado em uma oficina de extensão na Universidade Federal de Santa Catarina, no qual se utilizaram de um *checklist* de revisão sistemática e análise bibliométrica contendo os passos para efetuar as análises, e que pode servir como base para autores que irão realizar esses procedimentos (MEDEIROS *et al.*, 2015).

Medeiros *et al.* (2015) apresentam também etapas da revisão sistemática, análise bibliométrica e compilação de resultados. Esse *checklist*, mostrado na Tabela 2, é uma

ferramenta de trabalho para o pesquisador verificar, passo o passo, como está se desenvolvendo o processo de pesquisa.

Tabela 2: *Checklist* de revisão sistemática e análise bibliométrica.

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
1) Definir a pergunta e determinar os objetivos	O que se deseja pesquisar? Qual o tema? Como descrever com palavras-chaves?
2) Determinar um descritor de busca	Testar os termos componentes do descritor um a um no Google Scholar e selecionar operadores lógicos para integrá-los, formando assim o descritor. Exemplo de Algoritmo de busca: (“palavra 1” OR “palavra 2”).
3) Escolher as bases de dados pertinentes	Selecione-as dentre aquelas disponíveis no portal de periódicos da CAPES.
4) Realizar a busca	A busca pelo descritor é feita nas bases de dados escolhidas na etapa anterior.
5) Filtrar a busca por filtros ou critérios pré-selecionados	Exemplos de filtros: apenas artigos em periódico determinado, apenas publicações entre determinados anos, apenas publicações disponíveis na base da CAPES.
6) Usar <i>softwares</i> ou excel	Dos artigos que restaram depois do passo 5, faça <i>download</i> do arquivo .RIS ou .XLS e abra no <i>software</i> escolhido.
7) Sistematizar a bibliografia	Após as pesquisas, se estabelece critérios para determinar a validade e se há possibilidade dos resultados possuírem vieses. Explicitar e organizar os artigos por autor, ano de publicação, título, fonte, etc.
8) Analisar os resultados e criar relações entre eles	Com base nas semelhanças entre artigos, os dados serão agrupados para a obtenção das conclusões finais. Criar tabelas e gráficos para expressar os dados dos artigos, como principais autores, regiões do mundo ou centros de pesquisa mais importantes, <i>timeline</i> de publicações, anos.
9) Escrever um relatório	Escreva um texto integrando dados, tabelas, gráficos, análises e interpretações.

Fonte: Adaptado de Medeiros *et al.* (2015).

Medeiros *et al.* (2015) explica que a escolha das palavras-chaves é fundamental para a pesquisa ser direcionada e coerente. Os autores recomendam que as palavras sejam testadas isoladamente, no *Google Scholar*, verificando a quantidade de resultados, fazendo assim um comparativo com os termos mais apropriados para montar o descritor de busca. Esse descritor de busca é formado pelas palavras e por operadores booleanos, como *AND* e *OR* (Medeiros *et al.*, 2015).

Com esse descritor montado, Medeiros *et al.* (2015) diz que o pesquisador seleciona as bases de dados relacionadas a sua área de interesse, além de aplicar possíveis filtros na pesquisa na base de dados. O autor ressalva que deve-se utilizar o mesmo descritor em todas as bases de dados selecionadas, e nessas bases são coletados os dados em forma de arquivo “.RIS”, cujo pacote de dados é aberto em software como o ENDNOTE e o ZOTERO, ou “.XLS” para excel (Medeiros *et al.*, 2015).

Medeiros *et al.* (2015) conclui que a pesquisa científica precisa se basear em suportes confiáveis em termos de referências, e a revisão sistemática e análise bibliométrica são bons exemplos, pois fornecem para o pesquisador uma matéria-prima criteriosamente selecionada.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para esse trabalho se divide nos itens que serão explanados abaixo.

#### 3.1 Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica

No presente trabalho se utilizou o procedimento adaptado de revisão sistemática e análise bibliométrica baseada em uma metodologia pré-estabelecida explicada na revisão bibliográfica dos autores Medeiros *et al.* (2015) no qual, é um *checklist* com os passos importantes e que estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3: *Checklist* de revisão sistemática e análise bibliométrica.

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
1) Definir a pergunta e determinar os objetivos	Reciclagem química de polímeros
2) Determinar um descritor de busca	Descritor de busca: “ <i>chemical recycling polymers</i> ” Operador booleano – AND
3) Escolher as bases de dados pertinentes	<i>Web of Science</i> e <i>SciELO Citation Index</i> (disponíveis na CAPES).
4) Realizar a busca	
5) Filtrar a busca por filtros ou critérios pré-selecionados	Filtros: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anos 2012 – 2021;</li> <li>• Principal coleção da <i>Web of Science</i>;</li> <li>• <i>All languages</i>.</li> </ul>
6) Usar <i>softwares</i> ou excel	Download do arquivo .RIS ou .XLS, contendo os dados de todos os artigos.
7) Sistematizar a bibliografia	Análise de resumos, organização dos artigos por autor, ano de publicação, título, fonte, etc.
8) Analisar os resultados e criar relações entre eles	Determinar quais resultados se encaixam na pesquisa, leitura dos artigos completos, tabela com os principais dados de cada resultado da etapa 7 e gráfico de publicações por ano.
9) Escrever um relatório	

Fonte: Adaptado de Medeiros *et al.* (2015).

Através da tabela acima é possível estabelecer os passos que devem ser seguidos ao efetuar a revisão sistemática e a análise bibliométrica de uma forma organizada e confiável. As bases de dados *Web of Science* e *SciELO Citation Index* foram escolhidas por



apresentarem relevância no setor, além de estarem presentes no portal de periódicos da CAPES, disponível ao acesso.

Na base de dados da *Web of Science* se efetuou a pesquisa básica por tópico (TS) utilizando as palavras chave “*chemical recycling polymers*”, além de determinar filtros, como os anos das publicações, linguagens, entre outros. Com os mesmos filtros aplicados, mas utilizando a opção pesquisa avançada com operador booleano “AND”, se pesquisou outras palavras chaves, aplicando os mesmos filtros, como, “*chemical recycling polyethylene*” e “*chemical recycling polypropylene*”. Outra possibilidade é combinar as pesquisas salvas através de operadores AND ou OR. Assim, se combinou os resultados através do AND dos tópicos “*chemical recycling polyethylene*” e “*chemical recycling polypropylene*”, gerando um novo grupo de resultados. A última pesquisa é por título (TI), no qual se escolhe determinadas palavras que devem constar no título das publicações, para isso, se escolheu “*chemical recycling*”. Novamente utilizando a combinação de pesquisas entre a combinação anterior e a pesquisa por título, se obtêm os resultados. A Tabela 4 resume as pesquisas feitas.

Tabela 4: Pesquisas realizadas na *Web of Science* e *SciELO Citation Index*.

Pesquisas	Descrição
Pesquisa #1	TS=( <i>chemical recycling polymers</i> ) + filtros
Pesquisa #2	TS=( <i>chemical and recycling and polyethylene</i> ) + filtros
Pesquisa #3	TS=( <i>chemical and recycling and polypropylene</i> ) + filtros
Pesquisa #4	Combinando pesquisas #2 e #3 com AND.
Pesquisa #5	TI=( <i>chemical recycling</i> ) + filtros
Pesquisa #6	Combinando pesquisas #4 e #5 com AND.

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos, os trabalhos que possuem relevância para o escopo do tema pesquisado foram selecionados, verificando-se o que os autores propuseram em suas pesquisas, ou seja, processos, materiais e métodos, e quais conclusões obtiveram, com objetivo de se identificar as tecnologias que estão sendo utilizadas atualmente em reciclagem química de polímeros PE e PP.

### 3.2 Exemplos de esquemas de planta piloto de reciclagem química a partir de revisão bibliográfica

A partir da análise dos resultados obtidos no tópico anterior, identificou-se que vários estudos focam na pirólise e verificam através de técnicas e análises térmicas as porcentagens dos produtos, as variáveis que afetam os resultados, entre outros. Entretanto, poucos trabalhos efetuam projetos e esquemas possíveis de serem desenvolvidos e construídos. Desta forma, uma nova pesquisa na literatura foi realizada, com o objetivo de exemplificar o processo de pirólise com exemplos de *layouts* de esquemas de planta piloto de reciclagem química via pirólise.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados e discussões serão realizadas nas etapas descritas a seguir.

### 4.1 Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica

A partir da metodologia utilizada nas pesquisas, se obtiveram os seguintes resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Resultados obtidos nas pesquisas realizadas na *Web of Science*.

<b>Pesquisas</b>	<b>Descrição</b>	<b>Resultados</b>
Pesquisa #1	TS=( <i>chemical recycling polymers</i> ) + filtros	1587
Pesquisa #2	TS=( <i>chemical and recycling and polyethylene</i> ) + filtros	680
Pesquisa #3	TS=( <i>chemical and recycling and polypropylene</i> ) + filtros	318
Pesquisa #4	Combinando pesquisas #2 e #3 com <i>AND</i> .	147
Pesquisa #5	TI=( <i>chemical recycling</i> ) + filtros	486
Pesquisa #6	Combinando pesquisas #4 e #5 com <i>AND</i> .	13

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Resultados obtidos nas pesquisas realizadas na *SciELO Citation Index*.

<b>Pesquisas</b>	<b>Descrição</b>	<b>Resultados</b>
Pesquisa #1	TS=( <i>chemical recycling polymers</i> ) + filtros	9
Pesquisa #2	TS=( <i>chemical and recycling and polyethylene</i> ) + filtros	10
Pesquisa #3	TS=( <i>chemical and recycling and polypropylene</i> ) + filtros	2
Pesquisa #4	Combinando pesquisas #2 e #3 com <i>AND</i> .	1
Pesquisa #5	TI=( <i>chemical recycling</i> ) + filtros	6
Pesquisa #6	Combinando pesquisas #4 e #5 com <i>AND</i> .	0

Fonte: Autoria própria.

Como não se obteve resultados na última pesquisa na Scielo, serão consideradas somente as 13 publicações encontradas na *Web of Science*.

As publicações restantes da última pesquisa estão expostas na Tabela 7:

Tabela 7: Resultados obtidos.

Nº	Ano de publicação	Título da publicação	Nomes dos autores	Local de publicação
1	2012	<i>Research On The Suitability Of Organosolv Semi-Chemical Triticale Fibers As Reinforcement For Recycled HDPE Composites</i>	El Mansouri, Nour-Eddine; Espinach, Francesc X.; Julian, Fernando; Verdaguer, Narcis; Torres, Lluís; Llop, Miquel F.; Mutje, Pere	<i>Bioresources</i>
2	2012	<i>Polypropylene/natural rubber composites filled with recycled newspaper: Effect of chemical treatment using maleic anhydride-grafted polypropylene and 3-aminopropyltriethoxysilane</i>	Osman, H.; Ismail, H.; Mariatti, M.	<i>Polymer Composites</i>
3	2015	<i>Chemical Catalyzed Recycling of Polymers: Catalytic Conversion of PE, PP and PS into Fuels and Chemicals over H-Y</i>	Lerici, Laura C.; Renzini, Maria S.; Pierella, Liliana B.	<i>International Congress Of Science And Technology Of Metallurgy And Materials, Sam - Conamet 2013</i>
4	2017	<i>The future of plastics recycling Chemical advances are increasing the proportion of polymer waste that can be recycled</i>	Garcia, Jeannette M.; Robertson, Megan L.	<i>Science</i>
5	2017	<i>Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste</i>	Ragaert, Kim; Delva, Laurens; Van Geem, Kevin	<i>Waste Management</i>
6	2017	<i>Chemical recycling of waste plastics for new materials production</i>	Rahimi, AliReza; Garcia, Jeannette M.	<i>Nature Reviews Chemistry</i>
7	2018	<i>Physico-chemical properties of excavated plastic from landfill mining and current recycling routes</i>	Canopoli, L.; Fidalgo, B.; Coulon, F.; Wagland, S. T.	<i>Waste Management</i>
8	2018	<i>Coextruded Wood Plastic Composites Containing Recycled Wood Fibers Treated with Micronized Copper-Quat: Mechanical, Moisture Absorption, and Chemical Leaching Performance</i>	Mei, Changtong; Sun, Xiuxuan; Wan, Minli; Wu, Qinglin; Chun, Sang-Jin; Lee, Sunyoung	<i>Waste And Biomass Valorization</i>
9	2019	<i>Mechanical-Chemical Recycling of Low-Density Polyethylene Waste with Polypropylene</i>	de Camargo, Rayane Veloso; Saron, Clodoaldo	<i>Journal Of Polymers And The Environment</i>
10	2020	<i>Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste</i>	Thiounn, Timmy; Smith, Rhett C.	<i>Journal Of Polymer Science</i>

Continua

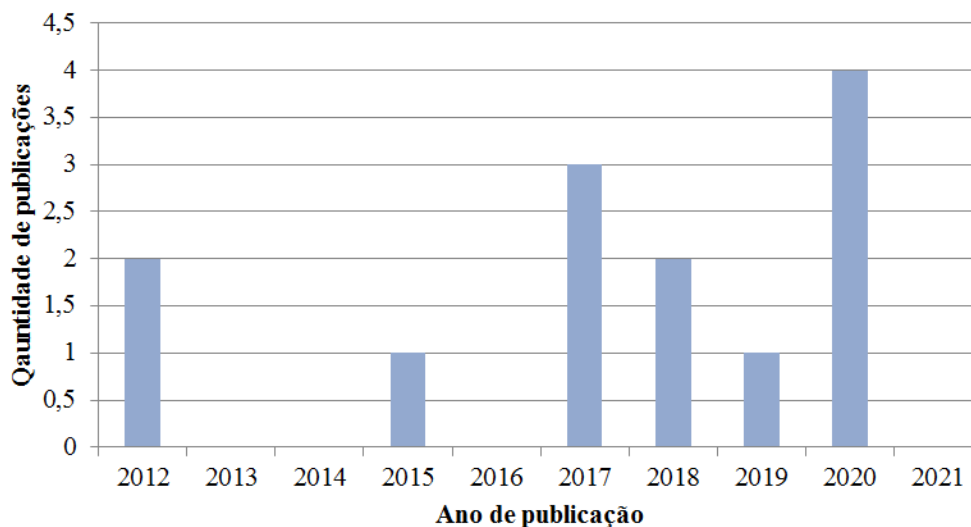
Continuação

11	2020	<i>Recycling and Chemical Upcycling of Waste Disposable Medical Masks</i>	Chen, Hai-ming; Dong, Xia; Zhao, Ying; Wang, Du-jin	<i>Acta Polymerica Sinica</i>
12	2020	<i>Solvent and non-solvent selection for the chemical recycling of waste Polyethylene (PE) and Polypropylene (PP) metallized film packaging materials</i>	Gorre, Regino C., Jr.; Tumolva, Terence P.	<i>International Conference On Sustainable Energy And Green Technology 2019</i>
13	2020	<i>Recycling printed polypropylene labels and polyolefins caps as chemical foaming agent to produce foam products</i>	Guillen-Mallete, J.; Gonzalez-Chi, P., I; Cruz-Estrada, R. H.; Miranda-Flores, R. N.; Rivero-Ayala, M. A.	<i>Journal Of Cellular Plastics</i>

Fonte: Autoria própria.

A partir das análises das informações sobre as publicações presente na tabela 7 se verifica que a maioria foi publicada em 2020, seguido de 2017, 2012 e 2018, e 2015 e 2019, conforme pode ser visto na Figura 9.

Figura 9: Gráfico de quantidade de publicações por ano.



Fonte: Autoria própria.

Acerca do local de publicação, dois foram apresentados em congressos, o trabalho número 3 *Chemical Catalyzed Recycling of Polymers: Catalytic Conversion of PE, PP and PS into Fuels and Chemicals over H-Y* no *International Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials (SAM CONAMET)* que ocorreu em 2013 em Puerto Iguazu, Argentina; e o número 12 *Solvent and non-solvent selection for the chemical recycling of waste Polyethylene (PE) and Polypropylene (PP) metallized film packaging materials* no

*International Conference on Sustainable Energy and Green Technology (SEGT)* que ocorreu 2019 em Bangkok, Tailândia.

Os artigos 1, 2 e 8 tratam de compósitos. O trabalho número 1 estudou a viabilidade de incorporar certo tipo de fibra como elemento de reforço em PEAD, realizando caracterizações da fibra e do compósito formado. Já a publicação número 2 fez um estudo sobre o efeito do tratamento químico usando polipropileno enxertado com anidrido maleico (MAPP) e 3-aminopropiltietoxissilano (3-APE). O desempenho do MAPP e do 3-APE foi investigado por meio de análises de caracterização dos compósitos PP/NR (*Polypropylene/natural rubber*). Por fim, o trabalho número 8 se propôs a extrusar um compósito de fibra de madeira com polímeros, possibilitando agregar valores às fibras de madeira tratadas para aplicações compostas com reduzido impacto ambiental.

O trabalho número 3 estudou a decomposição catalítica de diferentes polímeros (HDPE, LDPE, PP e PS) sobre a zeólita HY e o efeito das diferentes alimentações nos rendimentos de líquidos, gases e resíduos sólidos. Outro artigo, avaliou a reciclagem do resíduo pós-industrial de polietileno de baixa densidade (resíduo PEBD) na presença de polipropileno, utilizando processamento termomecânico e tratamento termoquímico do material, com a incorporação dos catalisadores zeólita ZSM-5 e Ziegler-Natta e submetidas ao tratamento térmico sob condições controladas de temperatura e fluxo de nitrogênio foi o objetivo do estudo número 9.

As publicações número 4, 5 e 10 apresentam alguns estudos sobre reciclagem química, informações sobre a área de reciclagem mecânica e química, além de revisões sobre os avanços da reciclagem química de três polímeros principais encontrados nos resíduos: PE, PET e PP. Complementando, na publicação número 6, os autores descrevem as tecnologias disponíveis para classificar e reciclar resíduos sólidos de plástico em matérias-primas, e as técnicas de reciclagem química comerciais de plásticos.

O artigo número 7 estudou a viabilidade de usar resíduos plásticos escavados de aterros sanitários como matéria-prima para reaproveitamento de produtos químicos ou combustíveis líquidos por meio da conversão termoquímica, enquanto que o artigo número 11 não foi encontrado sua disponibilidade para leitura.

Um método de seleção de solvente e não solvente para a reciclagem química por meio de dissolução seletiva e precipitação do envoltório de filme metalizado de resíduos multicomponentes é estudado para recuperar o PE, o PP e o filme metálico separadamente é apresentado no número 12. Já no artigo número 13 é estudada a reciclagem de rótulos

impressos de PP e tampas impressas de poliolefinas como um agente químico de formação de espuma para a produção de produtos de espuma.

Portanto, os estudos que serão considerados e avaliados nesse trabalho são os que possuem relação com o proposto pela autora e serão explicados mais detalhadamente, além de estarem destacados na Tabela 7: os artigos 3, 4, 5, 6, 9 e 10.

No trabalho “*Chemical Catalyzed Recycling of Polymers: Catalytic Conversion of PE, PP and PS into Fuels and Chemicals over H-Y*”, os autores estudaram a decomposição catalítica do HDPE, LDPE, PP e PS com catalisadores NH<sub>4</sub>-Y e zeólita H e analisaram o efeito das diferentes alimentações nos rendimentos líquidos, gasosos e sólidos residuais. Os autores utilizaram um reator de quartzo de leito fixo em batelada, com as amostras sendo submetidas a uma taxa de aquecimento constante de 10 °C/min da temperatura ambiente a 600 °C sob fluxo de nitrogênio de 50ml/min (LERICI; RENZINI; PIERELLA, 2015).

O polímero foi totalmente convertido em hidrocarbonetos gasosos (GHC), líquidos (LHC) e coque, sendo o maior rendimento de GHC. Outro experimento realizado mostrou que as condições severas empregadas durante os tratamentos químicos e térmicos não afetaram as características estruturais do catalisador (LERICI; RENZINI; PIERELLA, 2015).

Lerici, Renzini e Pierella (2015) ressaltam que a degradação catalítica usando zeólita apresentou resultados bons, pois foi alcançada uma redução notável no rendimento de resíduos sólidos em favor de produtos líquidos e gasosos. A degradação do HDPE rendeu uma porcentagem maior de frações mais pesadas (C11-C16) com 39% em peso, enquanto o craqueamento do LDPE e PP renderam cerca de 8% em peso (LERICI; RENZINI; PIERELLA, 2015). O craqueamento catalítico levou à formação de produtos líquidos, gases e coque como produtos de reação, enquanto o craqueamento puramente térmico de poliolefinas produziu ceras (LERICI; RENZINI; PIERELLA, 2015).

O trabalho “*The future of plastics recycling Chemical advances are increasing the proportion of polymer waste that can be recycled*” cita três direções que as pesquisas sobre reciclagem química estão seguindo: melhorar a eficiência e seletividade da reciclagem química por meio do desenvolvimento de catalisador, minimizar a necessidade de classificação por meio de *design* de compatibilizador e expandir a reciclagem para além dos termoplásticos. Uma das tecnologias existentes é a pirólise (GARCIA e ROBERTSON, 2017).

Garcia e Robertson (2017) dizem que para haver expansão da reciclagem diversificada de materiais poliméricos serão importantes pesquisas contínuas que poderão ajudar na otimização dos processos de reciclagem. Os autores citam que as pesquisas englobam o

desenvolvimento de catalisadores seletivos e eficientes, técnicas de descontaminação para a limpeza rápida de plástico, triagem mais eficiente em usinas de reciclagem, utilização de modelagem computacional avançada e análise de dados para novos catalisadores e compatibilizadores, (GARCIA e ROBERTSON, 2017).

O trabalho “*Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*” apresenta uma revisão das reciclagens mecânica e química de polímeros. Os autores explicam que o interesse atual não é apenas recuperar energia ou reciclar mecanicamente, mas também produzir produtos valiosos, como monômeros ou matérias-primas petroquímicas através da reciclagem química (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

De acordo com Ragaert, Delva e Van Geem (2017), a pirólise é um processo com tecnologia simples, entretanto, ela é economicamente viável quando realizada em grandes volumes, ou seja, os polímeros utilizados devem representar um volume grande, por exemplo, PE, PP, PS e PVC, que são os mais comuns e suas misturas são adequados para conversão em monômeros (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017). Contudo, os autores destacam que se a pirólise for integrada em um complexo já existente pode haver diminuições dos custos de investimento (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

O reator de pirólise primário pode ser de vários tipos de *design*, por exemplo, leito fluidizado borbulhante, reatores de tanque agitado, reator de *vortex* e reatores parafuso/sem-fim (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017). No entanto, o artigo cita que vários autores concluíram que os reatores de leito fluidizado são a opção mais favorável para a pirólise de plástico, devido a um vasto número de vantagens, como produto uniforme e taxas de conversão mais altas. Nesse tipo, se fluidiza o leito através de um gás de fluidização (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

De acordo com os autores, polímeros diferentes dão origem a especificações de produto completamente diferentes e mesmo que haja uma pequena quantidade de contaminação ou impureza de um tipo de plástico com outro, pode haver alterações nas propriedades e impedir o uso do material reciclado e pode fazer com que o produto obtido perca uma parte do seu valor (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017; GARCIA e ROBERTSON, 2017).

Os autores de “*Chemical recycling of waste plastics for new materials production*” explicam que dependendo do tipo de reciclagem química empregada pode haver dificuldades na reciclagem do PE e PP, e que uma técnica empregada na tentativa de despolimerizar esses polímeros é a pirólise, que fornece ceras e misturas de hidrocarbonetos leves que podem ser usados como combustível (RAHIMI e GARCÍA, 2017).



A pirólise de PP geralmente em temperaturas de 500 a 900 °C produz uma mistura de produtos e consome muita energia devido às propriedades isolantes de polipropileno. De acordo com os autores, devido a isso se desenvolveram catalisadores heterogêneos, como zeólitas de alta área superficial e que permitem a utilização em temperaturas abaixo de 500 °C (RAHIMI e GARCÍA, 2017).

A descoberta de métodos catalíticos para a reciclagem química de polímeros, que operam sob temperatura amena e com alta seletividade, poderia auxiliar na recuperação do monômero em escala industrial (RAHIMI e GARCÍA, 2017). Esses métodos de processamento devem ser simples e não consumir muita energia, com monômeros facilmente isoláveis e reversões altamente eficientes. Além disso, os materiais devem possuir propriedades mecânicas e térmicas para servir como alternativas aos plásticos usados atualmente (RAHIMI e GARCÍA, 2017).

No trabalho “*Mechanical-Chemical Recycling of Low-Density Polyethylene Waste with Polypropylene*” os autores citam que os métodos de reciclagem química de poliolefina, craqueamento térmico e catalítico são os mais viáveis em grandes escalas. No craqueamento térmico, uma ampla gama de produtos com massa molar variável pode ser obtida em temperaturas em torno de 500 °C ou mais; e no craqueamento catalítico se obtêm o mesmo resultado em tempo de reação e temperaturas menores (CAMARGO e SARON, 2019).

Um exemplo de catalisador empregado é a zeólita ZSM-5, que atua promovendo uma distribuição estreita na massa molar para polímeros e reduzindo a energia consumida no aquecimento (CAMARGO e SARON, 2019). Autores utilizaram proporções de zeólita ZSM-5 a 10% em peso e temperatura a 460 °C para obter um rendimento de pirólise em torno 90% em peso como produtos líquidos e gasosos. Já outro autor usou zeólita em 10, 30 e 50% em peso para a reciclagem do PP, para aumentar as taxas de conversão para formação de produtos pirolisados (CAMARGO e SARON, 2019).

Outro catalisador conhecido na indústria química é Ziegler-Natta, amplamente utilizado em sínteses de polímeros e copolímeros. De acordo com estudos, o Ziegler-Natta sob altas temperaturas catalisam a decomposição do PE, enquanto em temperaturas mais baixas leva ao crescimento de cadeias poliméricas (CAMARGO e SARON, 2019).

Os autores objetivaram obter um copolímero PE-PP com baixa cristalinidade e propriedades de borracha, a partir da reciclagem mecânica e química com catalisadores ZSM-5 e Ziegler-Natta (CAMARGO e SARON, 2019).

Obtiveram o resultado que o PP é menos estável termicamente do que o PEBD, mostrando decomposição térmica entre 314 e 460 °C. Essa menor estabilidade térmica do PP

está relacionada à cadeia, pois há carbonos terciários na estrutura química que favorecem a formação de radicais livres e decomposição térmica do material (CAMARGO e SARON, 2019). Além disso, as análises mostraram que tanto o zeólita ZSM-5 quanto o Ziegler-Natta induziram mudanças nas propriedades das misturas de PEBD e PP, como estabilidade térmica, entalpia de fusão, diminuição abrupta na capacidade de deformação, aumento da dureza e fluxo do material fundido e reações indesejadas de degradação oxidativa do polímero (CAMARGO; SARON, 2019).

Os autores concluíram que é possível modificar quimicamente a estrutura das misturas de polímeros do processo de reciclagem por meio do uso de catalisadores (CAMARGO e SARON, 2019).

O trabalho *“Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste”* destaca os estudos de métodos para reciclar quimicamente o PET, PE e PP. Os autores dizem que quando o processamento mecânico do PE não é mais viável, efetuar a despolimerização de PE através da pirólise possibilita produzir hidrocarbonetos para aplicações de combustível e/ou energia (THIOUNN e SMITH, 2020).

Os autores destacam alguns estudos de pesquisadores que verificaram a diferença entre a utilização de produtos plásticos virgens e resíduos no processo de pirólise térmica realizada a 350 ou 400 °C. As temperaturas de reação mais baixas renderam mais hidrocarbonetos leves ( $<C_{20}$ ) enquanto um aumento na temperatura produziu hidrocarbonetos mais pesados ( $>C_{20}$ ), concluindo que é possível ajustar o óleo obtido pela variação da temperatura de reação e explorar os fluxos de resíduos e, assim, contornar alguns dos desafios associados à separação de resíduos (THIOUNN e SMITH, 2020).

Já outro pesquisador utilizou vários tipos de plástico como matéria-prima, tendo como quantidade 1 kg, sendo possível, de acordo com o autor, ampliar a escala do sistema. Dependendo das proporções do óleo líquido residual de plástico os rendimentos variaram de 24 a 54%, e os valores de aquecimento se compararam ao diesel disponível comercialmente (THIOUNN e SMITH, 2020).

Thiounn e Smith (2020) explicam o estudo de um pesquisador que utilizou zeólitas HZSM-5, USY e  $NH_4ZSM-5$  como catalisadores, as mesmas se diferem com base no tamanho dos poros e área superficial. Esses pesquisadores verificaram que os catalisadores com tamanhos de poros maiores levaram a um maior rendimento de produtos líquidos e que os catalisadores menos ácidos produziram frações mais leves de gases e produtos líquidos, proporcionando flexibilidade no processo com base no uso final (THIOUNN e SMITH, 2020).

A empresa Resynergi se concentra na pirólise de resíduos de plásticos mistos, utilizando a energia de micro-ondas para induzir uma pirólise rápida, no qual, os resíduos de plástico são aquecidos a temperaturas entre 650 e 700 °C. A matéria-prima é alimentada em uma câmara de pirólise sob uma atmosfera inerte de nitrogênio ou argônio, com pressões de 1 a 2 psig. Os gases da pirólise são enviados através de condensadores, que condensam os gases pesados e ceras, depois o diesel e, em seguida, gases mais leves. Essas frações podem então ser usadas como combustíveis (THIOUNN e SMITH, 2020).

O processo da Plastic2Oil especifica que utiliza resíduos plásticos não separados e não lavados, no qual, são pré-fundidos em uma temperatura de 250 a 340 °C para que as impurezas de baixo peso molecular sejam queimadas ou volatilizadas. Esses resíduos são alimentados em um reator de pirólise mantido a 340 a 445 °C, com tempos de residência de 10 min. Os gases de pirólise são levados para torres de catalisador, que possuem diferentes zonas de temperatura para facilitar reação dos gases-alvo em cada estágio. O processo rende produtos de combustível líquido e gás de síntese com proporções variadas dependendo do plástico alimentado (THIOUNN e SMITH, 2020).

A Plastic Energy é uma empresa que emprega uma técnica de pirólise patenteada denominada Anaeróbia Térmica Conversão (TAC) em que os resíduos de plástico podem ser termicamente decompostos em uma mistura de vários hidrocarbonetos óleos que podem ser usados como combustível. Nesse processo de pirólise, os *pellets* ou flocos de resíduos de plástico são os primeiros extrusados a 300 °C e, em seguida, transferidos para um ambiente livre de oxigênio, a câmara de pirólise fica em torno de 390-410 °C, onde são agitados com um agitador. Os gases de pirólise são enviados através um condensador, no qual os hidrocarbonetos de cadeia longa mais pesada são condensados e enviados de volta ao reator de pirólise. Os gases de pirólise consistem em diesel, querosene, óleo leve e componentes cerosos que são separados por destilação. Os componentes ceroso são alimentados de volta no reator de pirólise e o diesel, querosene e óleos leves podem ser vendidos como combustíveis (THIOUNN e SMITH, 2020).

O processo da empresa GreenMantra envolve um processo termoquímico em que os resíduos de plástico consistindo em uma mistura de PE e PP com pequenas quantidades de PS, são pré-tratados, pré-aquecidos, após, colocados em um reator de pirólise em que o resíduo de plástico sofre despolimerização. Esta etapa pode incluir catalisadores como zeólitas ou à base de alumina, a fim de atingir os produtos de interesse. Por fim, os gases são enviados para um resfriamento, no qual, são condensados e enviados para purificação, podendo ser comercializados (THIOUNN e SMITH, 2020).

Outro ponto levantado pelos autores é na questão da reciclagem de resíduos mistos, no qual, são incluídos os materiais multicamadas que são mais difíceis de reciclar através métodos de reciclagem primária e secundária (THIOUNN e SMITH, 2020). Assim, as tecnologias de reciclagem se concentram no craqueamento térmico de resíduos plásticos misturados complexos em produtos gasosos e líquidos. O processo envolve a separação inicial do PET e HDPE, a fim de reciclá-los em um processo diferente. O resto dos resíduos misturados é triturado, em seguida, seco até que um teor de água menor que 5% em peso seja alcançado. Esses resíduos secos são alimentados em um reator de pirólise fluidizado em 400–600 °C. A pirólise produz combustível compreendendo hidrocarbonetos C<sub>5</sub> a C<sub>100</sub>, com cerca de 80% dos hidrocarbonetos consistindo de C<sub>5</sub> a C<sub>40</sub>. Uma fração do combustível da pirólise é usada para alimentar o próprio reator (THIOUNN e SMITH, 2020).

A RES Polyflow usa um sistema contínuo, que recicla plásticos mistos sem o uso de um catalisador e sem separação manual antes de alimentar o material para o reator. O processo patenteado depende de zonas no reator, no qual, em cada zona há uma fonte de saída onde os gases de pirólise podem ser capturados. Os produtos apresentam características semelhantes ao petróleo bruto, podendo ser processados em sistemas típicos de craqueamento de petróleo (THIOUNN e SMITH, 2020).

Outra empresa que divulgou seus estudos em reciclagem química é a Braskem juntamente com a EngePol - Laboratório de Engenharia de Polímeros da COPPE/UFRJ (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro), Instituto SENAI de Inovação em Biossintéticos e Fibras e a Fábrica Carioca de Catalisadores (FCC S.A.); tem como objetivo do projeto desenvolver catalisadores para melhorar a qualidade dos produtos gerados no processo de reciclagem química do plástico, através do processo de pirólise (BRASKEM, 2020). Além disso, de acordo com Yugue (2020), a empresa está lançando plantas pilotos no mercado, baseadas em reciclagem química de embalagens plásticas pós-consumo. Outros processos de pirólise estão sendo ofertados por *start-up's*, como ZEG Environmental, a Valora, a Wise e a EKT Global; cujo foco está na geração de energia, possibilitando a alimentação de mistura de plásticos, principalmente poliolefinas (YUGUE, 2020).

Ragaert, Delva e Van Geem (2017) também citam algumas plantas piloto de pirólise, como, o processo de *Mogami-Kiko*, ALTIS e *Sappro/Toshiba* no Japão, *Gossler Evitec* na Alemanha, *Royco Beijing* na China e *Changing World Technologies* nos EUA, no entanto, não apresenta detalhes dos processos.

A maioria das abordagens mencionadas pelos autores para a reciclagem de PE concentrou-se na pirólise para formar moléculas de cadeia mais curta que, em última análise, tendem a ser usadas em aplicações de combustível, no entanto, os produtos de pirólise também podem ser alavancados como matéria-prima para produzir outros polímeros.

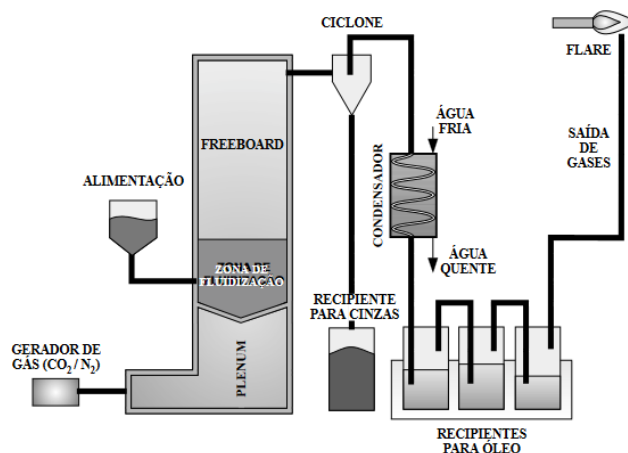
Os dois tipos de pirólise, térmica e catalítica, foram apresentadas e estudadas nos artigos obtidos pela metodologia de revisão sistemática. Os autores que empregaram pirólise catalítica usaram catalisadores zeólitas ZSM-5, zeólita H, NH<sub>4</sub>-Y e Ziegler-Natta, e os mesmos concluíram que a presença dos catalisadores influenciou na fragmentação das cadeiras poliméricas. Os reatores também foram de vários tipos, no entanto, Ragaert, Delva e Van Geem (2017) citam em seu artigo que vários autores já concluíram que utilizar reator de leito fluidizado é uma opção favorável para a pirólise de plástico.

#### 4.2 Exemplos de esquemas de planta piloto de reciclagem química a partir de revisão bibliográfica

Villablanca (2016) cita que é importante estudar modelos e possibilitar que a tecnologia dos laboratórios seja levada as indústrias, sem a necessidade de maiores investimentos. Assim, serão apresentados exemplos de *layouts* de esquemas de planta piloto do processo de reciclagem química de pirólise utilizando reator de leito fluidizado.

O aparato de pirólise de Goulart, Mariotoni e Sánchez (1999) utilizou uma taxa média de alimentação de 7 e 8 kg/h, obtendo como subprodutos: cinzas (coletadas no ciclone), o óleo e os gases (antes da queima no *flare*), e pode ser visualizado na Figura 10.

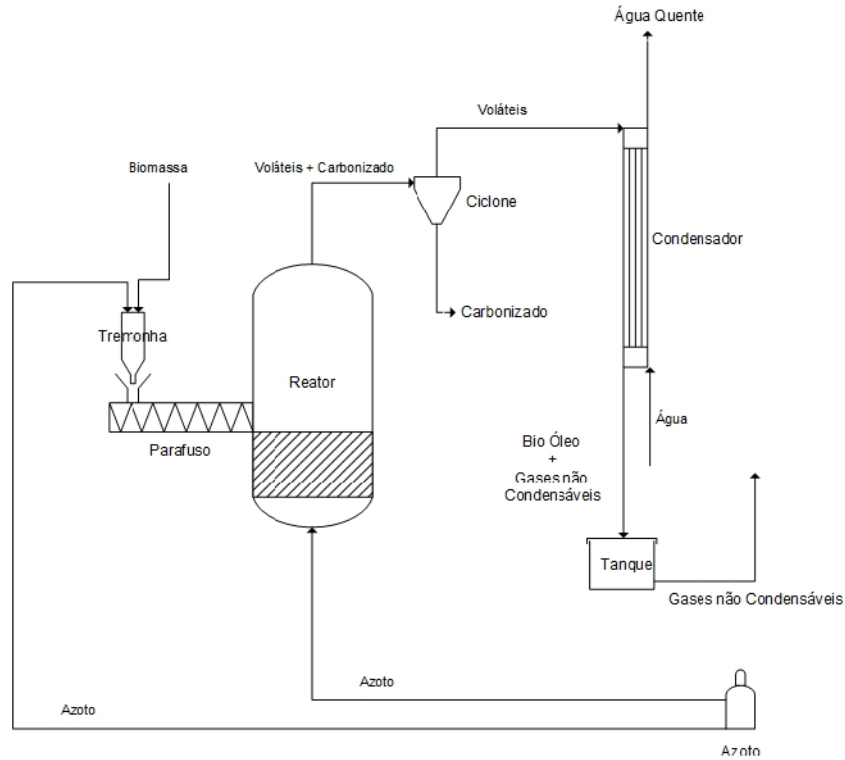
Figura 10: Diagrama esquemático do aparato de processo de pirólise.



Fonte: Goulart, Mariotoni e Sánchez (1999).

Gonçalves (2017) apresenta uma representação esquemática de um processo de pirólise rápida em leito fluidizado borbulhante, conforme Figura 11.

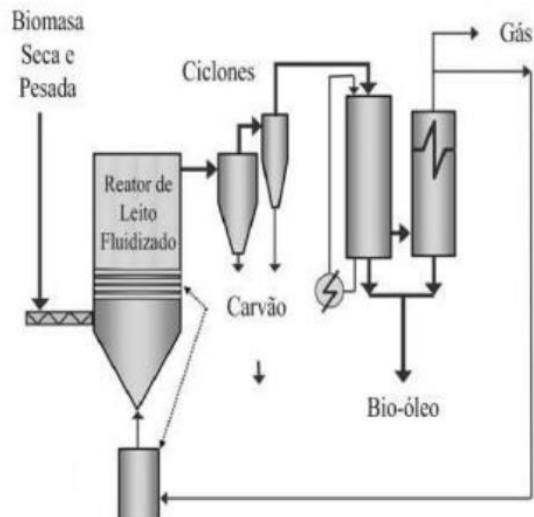
Figura 11: Esquema de processo de pirólise.



Fonte: Gonçalves (2017).

Na sequência, Yague (2020) apresenta um esquema de pirólise com reator de leito fluidizado realizado por Ding que efetuou em escala de laboratório a obtenção de óleo de alta qualidade a partir de resíduos sólidos urbanos, conforme Figura 12.

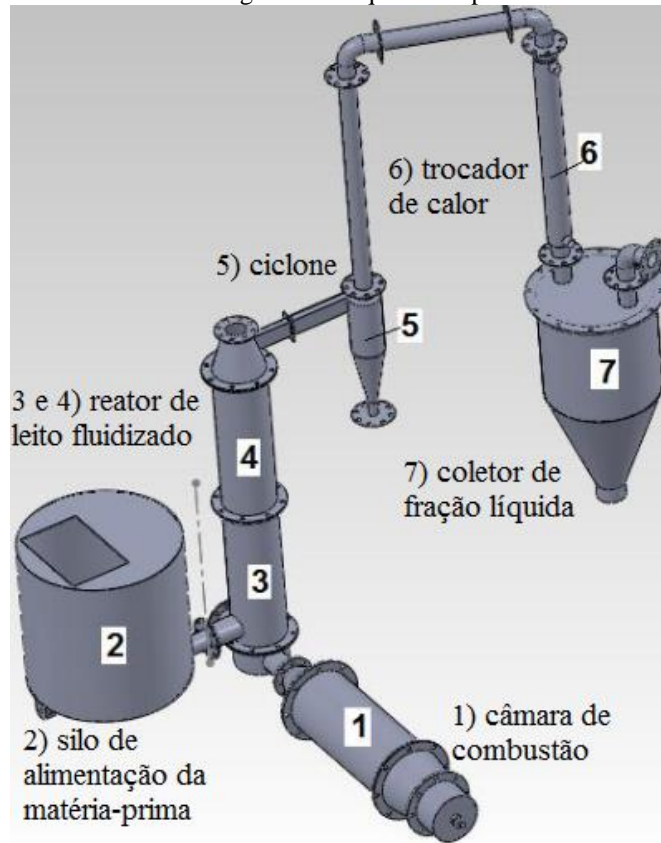
Figura 12: Esquema de pirólise.



Fonte: Yague (2020).

Já Camargo, Carvalho e Baptista (2015) além de apresentaram um esquema de pirólise térmica, construíram-no conforme o esquema da Figura 13.

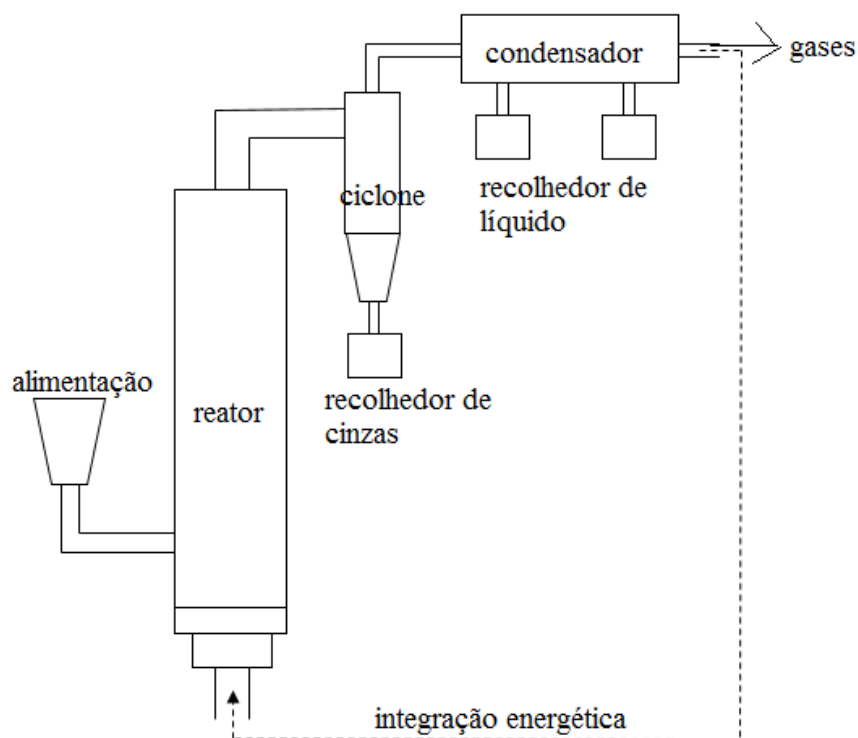
Figura 13: Esquema de pirólise.



Fonte: Adaptado de Camargo, Carvalho e Baptista (2015).

O esquema da Figura 14 de planta piloto de pirólise é possível de ser adaptado devido a sua simplicidade e características semelhantes às verificadas na literatura.

Figura 14: Esquema de planta piloto de pirólise.



Fonte: Adaptado de Freitas (2015).

Pode-se observar que cada esquema apresentado possui diferentes modelos, no entanto, os equipamentos principais aparecem em todos eles: alimentação, reator, ciclone e recolhimento de cinzas, condensador ou trocador de calor e recolhimento de líquidos; e gases. Verificando-se os modelos de esquemas apresentados é possível desenhar e visualizar quais são os equipamentos necessários em uma planta piloto de reciclagem química.

Freitas (2015) destaca que o conhecimento da fluidodinâmica das partículas no leito fluidizado é de suma importância para a determinação das condições operacionais adequadas para o processo. Assim, se buscou verificar quais os parâmetros imprescindíveis num projeto de planta piloto de reciclagem química por pirólise.

A fluidização possibilita versatilidade em processar materiais sólidos das mais variadas características físico-química (CAMARGO; CARVALHO; BAPTISTA, 2015). Desta forma, se emprega partículas finas, pois estas apresentam menores resistências à saída dos gases de decomposição, aumentando o rendimento do produto líquido (FREITAS, 2015). Na pirólise rápida de resíduos em leito fluidizado, utiliza-se um inerte, geralmente areia, para garantir maior homogeneidade do processo e elevadas taxas de transferência de calor (FREITAS, 2015). A areia pertence ao grupo de partículas Geldart B (GONÇALVES, 2017).



As partículas elutriadas são capturadas no ciclone e a eficiência deste equipamento na separação de sólidos dos gases pode ser prejudicada caso o projeto não leve em consideração o valor do TDH (CAMARGO; CARVALHO; BAPTISTA, 2015). Gonçalves (2017) cita as etapas que devem existir num processo de pirólise: secagem da alimentação (umidade inferior a 10%), trituração da alimentação para assegurar uma reação rápida, pirólise, separação rápida e eficiente de sólidos, e diminuição rápida de temperatura e recolhimento do produto líquido.

O resíduo é alimentado no reator por um dispositivo e, pode passar por etapas anteriores para algum tipo de tratamento preliminar do resíduo. Por exemplo, secagem e trituração. Após o reator, um conjunto de equipamentos de separação é necessário, como ciclones e condensadores, para promover a separação de possíveis sólidos presentes na fase gasosa e para separar os gases produzidos através dos diferentes pontos de ebulição. Neste processo também há a possibilidade de utilizar alguns produtos como fonte de energia para planta, integrando de forma energética todo o aparato.

Yugue (2020) apresenta que os rendimentos obtidos pela pirólise do plástico, a 600 - 700 °C em um reator de leito fluidizado fornecem diretamente 15% a 30% de olefinas gasosas dos resíduos, que podem ser usados imediatamente em uma instalação de polimerização. Alguns hidrocarbonetos de menor valor podem ser usados para fornecer energia para impulsionar e atender a demanda do processo de pirólise. O refino de poliolefinas por pirólise (com uma eficiência de 25%) pode cobrir até 20% da matéria-prima total de monômeros, aumentar a taxa de recuperação de resíduos e reduzir o consumo de combustíveis fósseis (YUGUE, 2020). Além disso, as plantas de pirólise podem usar os produtos de pirólise para outros fins, sendo possível aumentar a lucratividade do processo (YUGUE, 2020).

Kumar, Panda e Singh (2011) relatou que a degradação térmica do PE na faixa de temperatura de 370 a 450 °C obteve em maior quantidade na composição dos produtos gasosos, metano, etano e C<sub>3</sub>.

Os produtos obtidos pelo processo de pirólise podem ser coletados na planta piloto e quantificados, como verificar a massa do leito para observar e quantificar se houve material não elutriado ou cinzas; quantificar a massa do particulado elutriado que ficou retido no coletor de particulados; e quantificar a quantidade de líquido gerado no processo e que ficou retido no recipiente específico (CAMARGO; CARVALHO; BAPTISTA, 2015).

## 5 CONCLUSÕES

Apesar de o tema reciclagem ser um assunto muito debatido, alguns materiais possuem soluções não adequadas ou nem possuem solução devido a diversos fatores. Para os plásticos existem várias opções de reciclagem, sendo mais utilizada a mecânica, no entanto, a química vem ganhando espaço, buscando soluções para os materiais plásticos que não tem um bom aproveitamento pela reciclagem mecânica, possibilidade de gerar óleos, gases e cinzas que podem agregar valor na própria planta ou gerar um produto para venda.

Através da metodologia de revisão sistemática e análise bibliométrica foi possível verificar quais os rumos que as pesquisas em reciclagem química de polietileno e polipropileno estão seguindo, a partir dos critérios e filtros pré-estabelecidos. No entanto, praticamente nenhum autor utilizado na revisão bibliográfica apareceu nos resultados da revisão sistemática, devido às palavras-chave pesquisadas que acabam influenciando e delimitando os resultados. Por exemplo, foram filtrados polietileno e polipropileno como palavras-chave, entretanto, alguns trabalhos utilizam os RSU, resíduos sólidos urbanos, que englobam os plásticos no estudo de uma maneira geral. Contudo, a interpretação dos dados da metodologia de revisão sistemática e análise bibliométrica permite confirmar o expressivo aumento de trabalhos sobre reciclagem química.

Muitos estudos efetuam a pirólise e verificam através de técnicas e análises térmicas as porcentagens dos produtos, as variáveis que afetam os resultados, entre outros, entretanto, poucos trabalhos fazem projetos e esquemas possíveis de serem desenvolvidos e construídos. A pirólise tem um bom potencial para converter resíduos de plástico em produtos como óleo, gás e carvão líquido, e energia, sendo uma boa solução para reciclagem. Por conseguinte, se verificou que o reator de leito fluidizado é o mais adequado para reciclagem química via pirólise de polietileno e polipropileno a partir do estudo dos resultados obtidos pela técnica de revisão sistemática e análise bibliométrica.

Pelos exemplos de esquemas de planta piloto de reciclagem química, pode-se perceber que cada esquema apresentado possui diferentes *layouts*, entretanto, os equipamentos principais aparecem em todos eles, sendo possível estudar e propor um esquema próprio. Além disso, para um projeto de planta piloto é importante que se leve em consideração equipamentos e instalações apropriadas para o processo, controle e monitoramento de emissões, resíduos e produtos que não são utilizados.

Desta forma, este trabalho conseguiu verificar a partir do procedimento de revisão sistemática e análise bibliométrica o reator utilizado na reciclagem química via pirólise de PE

e PP, além disso, pelos exemplos de *layouts* de esquemas de planta piloto do processo de reciclagem química de pirólise utilizando reator de leito fluidizado conseguiu-se visualizar os equipamentos necessários. Portanto, foi possível verificar r uma alternativa para implantação, e realização de testes e estudos a respeito do tema, em uma indústria de reciclagem de polímeros da região.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Por fim, se sugere alguns pontos para trabalhos futuros: calcular e dimensionar o projeto de ciclone, cálculo do parâmetro TDH e recolhedor de cinzas, condensador e recolhedor de líquidos, e recolhimento de gases.

## REFERÊNCIAS

- ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Brasil). **Perfil 2019**: indústria brasileira de transformações e reciclagem de material plástico. São Paulo: Abiplast, 2019. 53 p. Disponível em: [http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil\\_2019\\_web\\_abiplast.pdf](http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil_2019_web_abiplast.pdf). Acesso em: 15 jun. 2021.
- ABNT - Associação Brasileira de Norma Técnicas. Projeto de revisão NBR 13230: simbologia indicativa de reciclabilidade e identificação de materiais plásticos. Rio de Janeiro, 8p, 2008.
- AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**. Barueri: Manole, 2007.
- AVELINO, Guilherme Monteiro. A reciclagem química como alternativa ao tratamento de resíduos plásticos no Brasil. 2020. 64f. Trabalho de Conclusão de Curso [Graduação em Engenharia Química], Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 2020.
- BARROS, Jean Michell Nogueira; BORGES, João Vitor Quintiliano Silverio. **PROJETO DE GRADUAÇÃO ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DE UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE**. 2017. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2017.
- BRASKEM. **Reciclagem química dos plásticos**. Set 2020. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/braskem-avanca-em-pesquisas-sobre-reciclagem-quimica-de-plasticos>. Acesso em: 05 ago 2021.
- BRETAS, Rosario Elida Suman; ÁVILA, Marcos Akira d'. **Reologia de polímeros fundidos**. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2010. 257 p.
- CAMARGO, Fernando de Lima. **Estudo da pirólise rápida de bagaço de cana em reator de leito fluidizado borbulhante**. Campinas, SP [s.n.], 2006. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 2006.
- CAMARGO, Fernando de Lima; CARVALHO, Renan de Souza; BAPTISTA, Antonio Sampaio Reator de leito fluidizado multiuso para estudos de combustão, gaseificação e pirólise de biomassa. **Bioenergia em revista: diálogos**, ano 5, n. 1, p. 73-86, jan./jun. 2015.
- CAMARGO, Rayane Veloso de; SARON, Clodoaldo. *Mechanical–Chemical Recycling of Low-Density Polyethylene Waste with Polypropylene*. **Journal Of Polymers And The Environment**, [S.L.], v. 28, n. 3, p. 794-802, 23 dez. 2019. Springer Science and Business Media LLC.
- CANEVAROLO Jr, Sebastião V.. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.
- CLARIVATE. **Web of Science**. 2021. Disponível em: <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>. Acesso em: 30 jun. 2021.

CLARIVATE. **SciELO Citation Index**. 2021. Disponível em: [https://clarivate-com.translate.google.com/webofsciencegroup/solutions/webofscience-scielo/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt-BR&\\_x\\_tr\\_pto=ajax,sc,elem](https://clarivate-com.translate.google.com/webofsciencegroup/solutions/webofscience-scielo/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=ajax,sc,elem). Acesso em: 30 jun. 2021.

COLTRO, Leda; GASPARINO, Bruno F.; QUEIROZ, Guilherme de C.. Reciclagem de Materiais Plásticos: A Importância da Identificação Correta. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 18, n. 2, p.119-125, 2008.

CZAJCZYNSKA, Dina *et al.* *Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector.* **Energy Procedia**, Berkshire, v. 1, n. 123, p. 387-394, abr. 2017. *1st International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains*.

DA SILVA, Camila Morandi. **Minimização da geração de resíduos líquidos através da mudança de metodologia cromatográfica para determinação de desluzantes em polipropileno**. UFRGS. Instituto de Química. Porto Alegre, 2010.

DE PAOLI, Marco Aurelio. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. 2. ed. Campinas: Chemkeys, 2008. 228 p.

ERIKSEN, M. K *et al.* *Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling.* **Elsevier - Waste Management**, Lyngby - Dinamarca, v. 96, p. 75-85, Ago 2019.

FARIA, F. P.; PACHECO, E. B. A. V.. Aplicação da Ferramenta Produção Mais Limpa na Reciclagem de Plástico. *In: 2ND INTERNATIONAL WORKSHOP / ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION*, 2009, São Paulo. **Workshop**. São Paulo, 2009. p. 1-9.

FERNANDES, Fabiano André Narciso; LONA, Liliane Maria Ferrareso. **Introdução a Modelagem de Sistemas de Polimerização**. São Carlos, SP: Editora Boolink, 2004. 125 p.

FORLIN, Flávio J.; FARIA, José de Assis F.. Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Campinas, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2002.

FREITAS, Thaís Magnago. **Análise experimental e numérica do escoamento ar-areia-compósito PEBD/Al em leito fluidizado**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo. 2015

GAUTO, Marcelo Antunes; ROSA, Gilber Ricardo. **Processos e Operações Unitárias da Indústria Química**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.

GARCIA, Jeannette M; ROBERTSON, Megan L. *The future of plastics recycling: chemical advances are increasing the proportion of polymer waste that can be recycled.* **Science: Polymer Chemistry**, [S.L.], v. 358, n. 6365, p. 870-872, nov. 2017.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. *Production, use, and fate of all plastics ever made.* **Science Advances**, [S.L.], v. 3, n. 7, p. 1-5, jul. 2017. *American Association for the Advancement of Science (AAAS)*.

GONÇALVES, Rui Pedro Santos. **Dimensionamento de um Reator de Pirólise de Leito Fluidizado Borbulhante para Produção de Bio Óleo**. 2017. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017.

GOULART, Eduardo A.; MARIOTONI, Carlos A.; SÀNCHEZ, Caio G.. Utilização da Gaseificação de Pneus Usados em Leito Fluidizado para a Produção de Energéticos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Campinas, p. 123-128, out-dez 1999.

JÚNIOR, Humberto Arimatéia. **Pirólise de Misturas Plásticas**. 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

KUMAR, Sachin; PANDA, Achyut K.; SINGH, R.K.. *A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel*. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 55, n. 11, p. 893-910, set. 2011. Elsevier BV.

LERICI, Laura C.; RENZINI, María S.; PIERELLA, Liliana B.. *Chemical Catalyzed Recycling of Polymers: catalytic conversion of pe, pp and ps into fuels and chemicals over h-y*. **Procedia Materials Science**, [S.L.], v. 8, p. 297-303, out. 2015. Elsevier BV.

LONTRA, Beatriz Gondin da Fonseca. **Reciclagem mecânica de Polietileno de Alta Densidade obtido a partir de Sacolas Plásticas**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

MAIER, Clive. CALAFUT, Teresa. **Polypropylene. The definitive User's Guide and Databook**. *Plastics Design Library*, PDL. 452 p. 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9781884207587/polypropylene#book-description>. Acesso em: 04 de nov de 2019.

MEDEIROS, Ivan L. de *et al.* Revisão Sistemática e Bibliometria facilitadas por um Canvas para visualização de informação. **Infodesign: Revista Brasileira de Design da Informação / Brazilian Journal of Information Design**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 93-110, 2015.

PERONDI, Daniele. **Co-pirólise de resíduos de pneus e resina polimérica presente na areia de fundição em um reator de leito fluidizado**. 89 f. : Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2013.

PIVA, Ana Magda; WIEBECK, Hélio. **Reciclagem do plástico**. São Paulo: Artliber Editora, 2004.

RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens; VAN GEEM, Kevin. *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. **Waste Management**, [S.L.], v. 69, p. 24-58, nov. 2017. Elsevier BV.

RAHIMI, Alireza; GARCÍA, Jeannette M.. *Chemical recycling of waste plastics for new materials production*. **Nature Reviews Chemistry**, [S.L.], v. 1, n. 6, p. 1-11, jun. 2017. Springer Science and Business Media LLC.

RIBEIRO, Henrique César Melo. Bibliometria: quinze anos de análise da produção acadêmica em periódicos brasileiros. **Biblios** [online]. n. 69, p. 1-20, out. 2017

SOARES, Patrícia Bourguignon; *et al.* Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados *Web of Science*. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 175-185, jan. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; DE PAOLI, Marco Aurelio de. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, Campinas, v. 28, n. 1, p.65-72, jan. 2005.

THIOUNN, Timmy; SMITH, Rhett C.. *Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste*. **Journal Of Polymer Science**, [S.L.], v. 58, n. 10, p. 1347-1364, 20 abr. 2020. Wiley.

Villablanca, Daniel Alejandro Torres. **Formulação numérica do processo de conversão termoquímica de biomassa em combustíveis líquidos/gasosos: estudos fundamentais**. 97 folhas, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

YUGUE, Eduardo Tadashi. **Desafios e potenciais soluções para reciclagem de embalagens plásticas flexíveis pós-consumo no Brasil**. 2020. 231 p. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2020.