



***Roadmap* Tecnológico da Produção de
Combustíveis a partir da Pirólise de Resíduos
Plásticos**

Juliana Moreira Barreto

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.

André Ferreira Young, D.Sc.

Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

Janeiro de 2022

ROADMAP TECNOLÓGICO DA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS A PARTIR DA PIRÓLISE DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

Juliana Moreira Barreto

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

Fabiana Valéria da Fonseca, D.Sc.

Orientada por:

Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.

André Ferreira Young, D.Sc.

Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Janeiro de 2022

Barreto, Juliana Moreira.

Roadmap Tecnológico da Produção de Combustíveis a partir da Pirólise de Resíduos Plásticos / Juliana Moreira Barreto. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022.

x, 93 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021.

Orientadores: Raquel Massad Cavalcante, André Ferreira Young e Flávio da Silva Francisco.

1. *Roadmap* Tecnológico. 2. Resíduos Plásticos. 3. Pirólise. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Raquel Massad Cavalcante, André Ferreira Young e Flávio da Silva Francisco. I. *Roadmap* Tecnológico da Produção de Combustíveis a partir da Pirólise de Resíduos Plásticos.

“At the end of life, we will not be judged by how many diplomas we have received, how much money we have made, how many great things we have done. We will be judged by “I was hungry, and you gave me something to eat, I was naked, and you clothed me. I was homeless, and you took me in.”” — Madre Teresa

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar e proteger a minha jornada.

Aos meus pais, Lúcia e Vinícius, pelo amor, sustentação e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Ao meu irmão, Pedro, e à minha prima-irmã, Isabelle, pelo carinho e companheirismo diário desde a infância.

Ao meu namorado, Felipe, por todo amor, paciência, apoio emocional e técnico durante o colégio e toda a graduação. Sem ele, com certeza, eu não chegaria até aqui!

Aos meus avós, Francisca e Paulo, Cecília e Mauro, e padrinhos, Verônica e César, por serem sempre participativos e presentes. Sou grata por tudo que fazem por mim.

À minha família (que não é nada pequena), tios, tias, primos e primas que estão sempre torcendo por mim e me incentivando, especialmente o meu tio Vinícius.

À minha segunda família, Natasha, Lucas e Ricardo, pelo carinho dedicado por toda a vida. Em especial à Natasha, pela irmandade e cumplicidade desde quando éramos crianças.

Aos amigos do LPBM, por todo amparo e ensinamentos sobre todos os ângulos da vida.

À minha amiga de infância, Julia, pela amizade e por compartilhar tantos momentos especiais comigo.

Aos professores e amigos do CMRJ, que me deram toda a base para que eu entrasse em Engenharia Química na UFRJ.

Ao meu antigo grupo de IC, LAPOCAT, formado pela profa. Elizabeth, Paula, Leina, Adryena e Amanda, pelos aprendizados e vivências na pesquisa acadêmica.

À minha antiga equipe de trabalho do BNDES, GAC1, pelo compartilhamento do conhecimento e conselhos da jornada profissional.

À EQ Hans-On e à minha equipe Operações I do ciclo de 2019, em especial Mariana e Ratier, pelas vivências e aprendizados práticos da Engenharia.

À minha equipe de trabalho na Radix, Downstream BR, pelas oportunidades de aprendizado e por todo o apoio no meu desenvolvimento profissional. Um agradecimento especial à Victória e ao Vitor, por deixarem o dia a dia no trabalho mais leve e divertido.

Aos meus orientadores, pelo suporte técnico e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho. E a todos os colegas de faculdade e professores, por contribuírem com a minha formação.

Todos foram a minha base para que eu pudesse chegar até aqui!

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

ROADMAP TECNOLÓGICO EM ECONOMIA CIRCULAR: PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS A PARTIR DA PIRÓLISE DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

Juliana Moreira Barreto

Janeiro, 2022

Orientadores: Raquel Massad Cavalcante, D.Sc.

André Ferreira Young, D.Sc.

Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

Com o baixo percentual de reciclagem atual e o aumento exponencial da produção de plásticos, há um conseqüente aumento na geração de resíduos deste material. Portanto, novas tecnologias são necessárias para viabilizar o tratamento dos resíduos plásticos através de alternativas ambientalmente corretas perante a ineficiente disposição final em aterros sanitários. Nesse sentido, tecnologias de reciclagem química têm se destacado como meios para a transição para uma Economia Circular. Uma das tecnologias de reciclagem química mais importantes é a pirólise, que se baseia na degradação térmica de materiais na ausência de oxigênio. Dependendo das condições do processo, a pirólise produz uma mistura líquida como principal produto. Este líquido produzido pode ser refinado em produtos químicos ou combustíveis. Com isso, neste trabalho propôs-se realizar uma prospecção tecnológica da produção de combustíveis a partir da pirólise de resíduos plásticos por meio de um *Roadmap* Tecnológico. A metodologia consiste em análises de curto, médio e longo prazo do setor através do levantamento de informações em artigos científicos, patentes e arquivos da mídia especializada. Assim, o *Roadmap* Tecnológico foi construído de acordo com taxonomias obtidas na etapa prospectiva. Os resultados avaliados mostram que, no estágio atual, a pirólise térmica é a tecnologia mais utilizada para produção de combustíveis a partir de resíduos plásticos, mas a longo prazo os estudos são direcionados à pirólise catalítica, visando a produção de outros produtos, como a nafta para *crackers* e químicos básicos. Gargalos tecnológicos identificados em trabalhos anteriores, como etapas de pré-tratamento e caracterização de produtos, estão, timidamente, sendo superados no curto, médio e longo prazo com a publicação de artigos e depósito de patentes com foco nestas taxonomias. No entanto, mais pesquisas precisam ser realizadas sobre o tema, para se alcançar uma maturidade tecnológica nessa área. Quanto à atuação do Brasil no setor de pirólise, o país mostra-se muito atrasado em relação aos países europeus, aos chineses, americanos e indianos, com participação praticamente nula no mapeamento. No entanto, a presença de grandes *players* petroquímicos brasileiros no setor sugere possíveis oportunidades e incentivos a projetos de pirólise de resíduos plásticos no país.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÕES.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2	PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA.....	5
2.1	CONCEITOS DE PROSPECÇÃO E <i>ROADMAP</i> TECNOLÓGICO.....	5
2.2	TIPOS DE <i>ROADMAPS</i>	6
3	METODOLOGIA.....	7
3.1	ELABORAÇÃO DO <i>ROADMAP</i>	7
3.2	PESQUISA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS.....	10
3.3	PESQUISA DE PATENTES DEPOSITADAS.....	11
3.4	PESQUISA DE PATENTES CONCEDIDAS.....	12
3.5	PESQUISA DO ESTÁGIO ATUAL.....	12
4.	ETAPA PRÉ-PROSPECTIVA.....	14
4.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	14
4.1.1	Panorama Mundial.....	14
4.1.2	Panorama Brasileiro.....	16
4.2	RESÍDUOS PLÁSTICOS.....	18
4.2.1	Fontes e tipos de resíduos plásticos.....	18
4.2.2	Panorama Mundial.....	19
4.2.3	Panorama Brasileiro.....	20
4.3	RECICLAGEM DE RESÍDUOS PLÁSTICOS.....	21
4.3.1	Reciclagem Mecânica.....	21
4.3.2	Reciclagem Energética.....	22
4.3.3	Reciclagem Química.....	22
4.3.4	Desafios da reciclagem de plásticos.....	23
4.4	PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM QUÍMICA.....	24
4.4.1	Pirólise Térmica.....	25
4.4.1.1	Influência da carga polimérica no produto.....	25
4.4.1.2	Influência da temperatura no produto.....	27
4.4.1.3	Influência do tempo de residência no produto.....	27
4.4.1.4	Tipos de reatores de pirólise.....	28
4.4.1.5	Processos existentes.....	29

4.4.1.6 Vantagens e desvantagens da pirólise térmica	31
4.4.2 Pirólise Catalítica	31
4.4.2.1 Influência da carga polimérica no produto.....	32
4.4.2.2 Influência da temperatura de reação.....	33
4.4.2.3 Agitação	34
4.4.2.4 Catalisadores	34
4.4.2.5 Processos e tecnologias existentes	35
4.4.2.6 Vantagens e desvantagens da pirólise catalítica.....	35
5. ETAPA PROSPECTIVA	37
5.1 LONGO PRAZO – ARTIGOS CIENTÍFICOS	37
5.1.1 Análise Macro	37
5.1.2 Análise Meso.....	40
5.1.3 Análise Micro.....	41
5.2 MÉDIO PRAZO – PATENTES DEPOSITADAS.....	44
5.2.1 Análise Macro	44
5.2.2 Análise Meso.....	47
5.2.3 Análise Micro.....	48
5.3 CURTO PRAZO – PATENTES CONCEDIDAS.....	50
5.3.1 Análise Macro	50
5.3.2 Análise Meso.....	52
5.3.3 Análise Micro	53
5.4 ESTÁGIO ATUAL	55
5.4.1 Análise Macro	55
5.4.2 Análise Meso.....	56
5.4.3 Análise Micro.....	57
6. ETAPA PÓS-PROSPECTIVA.....	60
6.1 ESTÁGIO ATUAL	60
6.2 CURTO PRAZO	64
6.3 MÉDIO PRAZO.....	66
6.4 LONGO PRAZO	68
7. CONCLUSÕES	72
7.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS	75
ANEXO 1 – ARTIGOS CIENTÍFICOS	79
ANEXO 2 – PATENTES DEPOSITADAS	85

ANEXO 3 – PATENTES CONCEDIDAS	89
ANEXO 4 – <i>ROADMAP</i> TECNOLÓGICO	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composição gravimétrica dos RSU – dados globais (2016).....	14
Figura 2: Métodos de descarte por renda dos países (2016)	15
Figura 3: Tratamento e descarte de resíduos – dados globais (2016).....	15
Figura 4: Gravimetria dos RSU no Brasil (2019).....	16
Figura 5: Disposição final de RSU nas regiões, por tipo de destinação no Brasil (2019).....	17
Figura 6: Geração de resíduos plásticos por setor – dados globais (2018)	18
Figura 7: Geração total de resíduos dos polímeros mais comuns – dados globais (2015)	19
Figura 8: Evolução temporal dos artigos publicados de 2017 a set/2021	37
Figura 9: Distribuição dos artigos por país de 2017 a set/2021.....	38
Figura 10: Distribuição dos artigos por tipo de instituição de 2017 a set/2021	39
Figura 11: Análise Meso dos artigos científicos	40
Figura 12: Evolução temporal das patentes depositadas de 2017 a nov/2021	44
Figura 13: Distribuição das patentes depositadas por país de 2017 a nov/2021	45
Figura 14: Distribuição de patentes depositadas por tipo de instituição de 2017 a nov/2021..	46
Figura 15: Análise Meso das patentes depositadas	47
Figura 16: Evolução temporal das patentes concedidas de 2017 a nov/2021	50
Figura 17: Distribuição das patentes concedidas por país de 2017 a nov/2021	51
Figura 18: Distribuição de patentes concedidas por tipo de instituição de 2017 a nov/2021...	52
Figura 19: Análise Meso das patentes concedidas	53
Figura 20: Países de origem dos <i>players</i> atuantes no estágio atual	56
Figura 21: Análise Meso do estágio atual	57
Figura 22: Estágio atual do <i>Roadmap</i> Tecnológico.....	61
Figura 23: Curto prazo do <i>Roadmap</i> Tecnológico	65
Figura 24: Médio prazo do <i>Roadmap</i> Tecnológico	67
Figura 25: Longo prazo do <i>Roadmap</i> Tecnológico	69
Figura 26: Longo prazo do <i>Roadmap</i> Tecnológico – continuação.....	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Taxonomias Meso e Micro	9
Tabela 2: Estratégia de busca de artigos na base Scopus	10
Tabela 3: Estratégia de busca de patentes depositadas.....	11
Tabela 4: Estratégia de busca patentes concedidas	12
Tabela 5: Polímeros e principais produtos da decomposição térmica de plásticos.	26
Tabela 6: Efeitos da carga polimérica no produto de pirólise	27
Tabela 7: Tipos de reatores e suas características.	28
Tabela 8: Análise Micro dos artigos científicos	42
Tabela 9: Análise Micro das patentes depositadas	48
Tabela 10: Análise Micro das patentes concedidas	54
Tabela 11: Análise Micro do estágio atual	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

O plástico desempenha um papel fundamental para o ser humano há mais de 50 anos. Embora os primeiros plásticos sintéticos, como a baquelite, tenham aparecido no início do Século XX, o uso generalizado de plásticos fora das forças armadas somente ocorreu depois da Segunda Guerra Mundial. A partir de então, o rápido crescimento na produção de plásticos mostrou-se extraordinário, ultrapassando a maioria dos materiais feitos pelo homem. Nesse cenário, o maior mercado de plásticos é o de embalagens, uma aplicação cujo crescimento foi acelerado por uma mudança global de consumo dos reutilizáveis pelos descartáveis de uso único. Como resultado, a participação dos plásticos nos resíduos sólidos urbanos aumentou consideravelmente nas últimas décadas, ao mesmo tempo que a geração global de resíduos sólidos também cresceu significativamente (GEYER *et al.*, 2017).

A maioria dos monômeros usados para fazer plásticos, como etileno e propileno, são derivados de hidrocarbonetos fósseis. Praticamente nenhum destes materiais, comumente usados, são biodegradáveis. Como consequência, eles se acumulam - em vez de se decompor - em aterros ou no meio ambiente. Nesse sentido, resíduos poliméricos são encontrados em todas as principais bacias oceânicas e são tão onipresentes no ambiente que seu acúmulo foi sugerido como um indicador geológico da Era Antropoceno (GEYER *et al.*, 2017)

Diante disso, a fim de reduzir o descarte de plástico em aterros, a reciclagem é considerada como uma alternativa para o tratamento deste tipo de resíduo. No entanto, os níveis de reciclagem encontram-se muito abaixo do esperado na maioria dos países. Esta solução tem se mostrado difícil e custosa devido às restrições de contaminação e separação do material antes do seu processamento. Além disso, com requisitos rigorosos para obtenção de produtos de elevado valor agregado, a reciclagem de plástico mostra-se bastante desafiadora na atualidade (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

No caso brasileiro, os índices de reciclagem permanecem em níveis inferiores a 4% na média nacional, mesmo com uma década de vigência da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Apesar das ações e campanhas para incentivar o setor e viabilizar o reaproveitamento dos materiais, a estagnação dos índices de reciclagem confirma a fragilidade das redes existentes, a falta de um sistema de logística reversa robusto e a inexistência de um mercado estruturado para absorver os resíduos, já que somente aqueles

cuja obrigatoriedade antecede a PNRS apresentaram resultados satisfatórios (ABRELPE, 2020).

Nesse contexto, a falta de investimentos no setor é considerada um desperdício econômico, uma vez que o polímero pós-consumo tem elevado potencial químico e energético que poderia ser aproveitado para produção de matérias-primas, combustíveis e energia, seja por meio da reciclagem energética, mecânica ou química.

A reciclagem mecânica – mais empregada no Brasil – consiste na conversão dos polímeros em grânulos que servem como matérias-primas para novos plásticos. De modo geral, é realizado um tratamento do resíduo para que seja fundido e incorporado à matéria-prima virgem. Entretanto, confere uma pior qualidade à mistura, tendo sua utilização limitada (ASSUMPCÃO *et al.*, 2018).

Já a reciclagem química reprocessa plásticos por meio de degradação térmica e/ou catalítica, transformando-os em petroquímicos básicos e frações de combustíveis, que têm variadas aplicações. Uma alternativa é a reciclagem energética, que recupera alto conteúdo de energia pela queima dos resíduos. Com isso, há um aproveitamento do calor gerado na produção de vapor e na geração de energia elétrica (ASSUMPCÃO *et al.*, 2018).

A pirólise é um tipo de reciclagem química que consiste na degradação dos polímeros de cadeia longa em moléculas menores e menos complexas por meio de calor e pressão, na ausência de oxigênio. Os três principais produtos resultantes são óleo, gás e carvão, que podem ser valiosos para indústrias, especialmente refinarias. Esta tecnologia está sendo estudada por muitos pesquisadores por ser um processo capaz de produzir alta quantidade de óleo líquido a temperaturas moderadas, em torno 500 °C. Além disso, a pirólise também é bastante flexível, pois os parâmetros de processo podem ser manipulados para otimizar o rendimento do produto com base nas preferências do empreendimento. O óleo líquido produzido pode ser usado em múltiplas aplicações como fornos, caldeiras, turbinas e motores a diesel (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Cabe destacar que este método apresenta maiores vantagens sobre os demais sistemas de tratamento de resíduos sólidos, uma vez que não causa contaminação da água e é considerado uma tecnologia verde - dado que os gases produzidos são reaproveitados no sistema como fonte de calor (ASSUMPCÃO *et al.*, 2018). Ademais, não demanda um processo intensivo de classificação como em outros tipos de reciclagem, sendo, portanto, menos trabalhoso (SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Destarte, a pirólise é um dos métodos que contribuem para a redução do descarte de recursos não degradáveis e tem representado uma das maiores mudanças no cenário de reciclagem (ASSUMPTÃO *et al.*, 2018). Mais especificamente, tendo em vista a definição de economia circular como sendo um modelo de produção e consumo, que envolve compartilhar, reutilizar, reparar, reformar e reciclar materiais e produtos existentes pelo maior tempo possível, estendendo o ciclo de vida e reduzindo a um mínimo a geração de resíduos (PARLAMENTO EUROPEU, 2015), tecnologias de pirólise podem desempenhar um papel essencial na transição para a Economia Circular de materiais plásticos (QURESHI *et al.*, 2020).

Diante deste contexto de acelerado desenvolvimento tecnológico, uma boa gestão do conhecimento antecipa as novas tecnologias possíveis ou as necessidades emergentes. Assim, para compreender o estado atual das tecnologias envolvidas neste setor, identificar as áreas que mais precisam de pesquisa e quais são mais exploradas, faz-se interessante um estudo de Prospecção Tecnológica (CARDOSO, 2017). Neste trabalho, foram analisadas diversas publicações, artigos científicos, patentes depositadas e concedidas, em um horizonte temporal definido. A prospecção foi realizada por meio de um *Roadmap* Tecnológico, onde é apresentado o estado da arte do setor de pirólise de resíduos plásticos no mundo.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a identificação das principais tendências tecnológicas no setor de reciclagem química, com enfoque na pirólise. Tais tendências estão relacionadas às composições de misturas de resíduos plásticos, às tecnologias envolvidas e às variedades de produtos que podem ser gerados, principalmente os combustíveis. Com base nesta proposta, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados ao longo deste estudo:

1. levantamento de artigos científicos, patentes concedidas e patentes depositadas sobre a produção de combustíveis a partir da pirólise de resíduos plásticos nas bases de dados correspondentes, e;
2. identificação das principais tecnologias para a produção de combustíveis a partir de plástico pós-consumo;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente monografia está estruturada em sete capítulos. Neste primeiro, é feita a introdução do tema e são explicitados os objetivos. No Capítulo 2, são abordados os conceitos de prospecção tecnológica, incluindo o *Roadmap* Tecnológico. A metodologia adotada para a elaboração deste trabalho foi detalhada no Capítulo 3. A pré-prospecção sobre o tema, envolvendo desde a contextualização de resíduos sólidos urbanos até os aspectos tecnológicos de reciclagem química de resíduos plásticos, pode ser encontrada no Capítulo 4. No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa prospectiva. O *Roadmap* Tecnológico, construído a partir das análises feitas no capítulo anterior, e as tendências obtidas são apresentados no Capítulo 6. As considerações finais, conclusões e perspectivas de trabalhos futuros figuram no Capítulo 7.

2 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

2.1 CONCEITOS DE PROSPECÇÃO E *ROADMAP* TECNOLÓGICO

De acordo com Kupfer e Tigre (2004), prospecção tecnológica define-se como uma maneira sistemática de mapear desenvolvimentos técnico-científicos capazes de influenciar significativamente a indústria, a economia e a sociedade em geral. Os estudos prospectivos, por meio de métodos qualitativos e quantitativos, fornecem as principais tendências tecnológicas e facilitam a construção de soluções viáveis para um objetivo futuro pretendido. Dessa forma, busca-se agregar valor às informações do presente, transformando-as em conhecimento útil às organizações na elaboração de estratégias e identificação de oportunidades (EMBRAPA, 2013).

Diante dessa perspectiva, a predição das mudanças tecnológicas torna-se um procedimento complexo, sendo necessária a utilização de ferramentas de inteligência competitiva e prospecção tecnológica para direcionar a tomada de decisão de empresas e organizações, que incluem técnicas de Matriz SWOT, *Brainstorming*, o método Delphi e o *Roadmap* Tecnológico (MOREIRA, 2016).

O *Roadmap* Tecnológico (*Technology Roadmap* – TRM), foi originalmente elaborado pela Motorola Inc. com a finalidade de aprimorar o desenvolvimento de produtos e o suporte tecnológico (DRUMMOND, 2005). Atualmente, devido às possibilidades de correlacionar produtos, mercados e tecnologias, sua utilização expandiu-se para aplicações na política e na gestão da inovação, por exemplo. Nesse contexto, é uma ferramenta visual que gerencia o futuro da tecnologia e descreve o direcionamento que uma organização deve seguir para alcançar os resultados e objetivos a curto, médio e longo prazo.

Na literatura são encontradas diversas formas de organização de um TRM. A representação gráfica genérica é baseada em uma linha temporal no eixo horizontal e em três camadas no eixo vertical, caracterizando as dimensões mercadológica, de produto e tecnológica. É possível, ainda, visualizar as relações existentes entre as camadas e as restrições de tempo, permitindo a percepção de lacunas no planejamento estratégico e, por isso, essa metodologia está sendo cada vez mais aplicada por tomadores de decisão (TAVARES, 2021).

2.2 TIPOS DE ROADMAPS

Os *Roadmaps* podem ser construídos em formatos variados, sendo a natureza visual desta ferramenta uma de suas características mais importantes, uma vez que contribui na discussão construtiva dos processos de prospecção tecnológica. Garcia e Bray (2007) identificaram três tipos: o *Roadmap* de tecnologia emergente, que avalia os cenários atuais e futuros, sob a perspectiva da competitividade industrial; o *Roadmap* de produto, voltado às necessidades de um produto ou processo; e o *Roadmap* focado em um assunto previamente definido, a fim de melhorar o planejamento financeiro e estratégico de uma empresa (POLI, 2019).

Outro trabalho similar foi desenvolvido por Phaal *et al.* (2004) com o objetivo de identificar os tipos e formatos de TRM presentes na literatura e, assim, classificar quanto aos diferentes escopos de formato e planejamento. Foram, portanto, definidos oito formatos para a representação gráfica e oito tipos de *Roadmaps* com objetivos diferentes. Em relação aos formatos, tem-se: camadas do tipo múltiplas, barras, tabela, simples, gráfico, texto, figura e fluxograma. Já referente ao propósito, pode-se ter: planejamento de produto, de serviço/capacidade, estratégico, de longo prazo, de conhecimento, do programa, do processo, de integração. A decisão de qual formato e tipo de *Roadmap* Tecnológico que será empregado dependerá da finalidade de cada projeto. (POLI, 2019).

3 METODOLOGIA

3.1 ELABORAÇÃO DO ROADMAP

Este trabalho baseou-se na metodologia de Borschiver e Silva (2016), com a construção do mapa dividindo-se em três principais etapas. A primeira etapa, nomeada como Pré-prospectiva, baseou-se na busca de forma aleatória do assunto abordado a fim de se obter uma visão mais geral do estado da arte. Na etapa prospectiva, posterior, iniciou-se a busca orientada de documentos conforme estratégia definida. A consolidação das informações coletadas foi, então, estruturada em quatro períodos temporais descritos a seguir:

- Estágio Atual: os conteúdos desta fase são voltados para tecnologias, ações e parcerias de movimentos atuais. As informações são obtidas por meio da mídia, sites de empresas, organizações não governamentais e governamentais.
- Curto Prazo: são analisadas patentes concedidas. Como neste caso já houve proteção da tecnologia, espera-se que ela esteja mais próxima da fase comercial.
- Médio Prazo: são analisadas patentes solicitadas, que, embora demonstrem um certo avanço no desenvolvimento da tecnologia, ainda estão com a proteção sob análise, indicando uma certa distância entre as fases de desenvolvimento e comercialização.
- Longo Prazo: são analisados artigos científicos, que, por ainda estarem em estágio acadêmico, demonstram um grau incipiente de maturidade do desenvolvimento da tecnologia.

Conforme mencionado, o desenvolvimento de uma tecnologia pode ser verificado pela análise de patentes. São bons indicadores de inovação, produtividade e estrutura da indústria, pois, por ter o estado da arte como um elemento crítico, as patentes devem conter um relatório descritivo apresentado de forma clara, a fim de esclarecer o desenvolvimento tecnológico pleiteado.

Patentes podem ser encontradas em diversas bases de dados, podendo ser citadas aquelas vinculadas a escritórios nacionais, como o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) brasileiro, o Escritório de Marcas e Patentes dos Estados Unidos (USPTO), o Escritório Europeu de Patentes (Espacenet), o Escritório Japonês de Patentes (JPO), o Escritório Chinês de Patentes (SIPO) e a Organização Mundial da Propriedade Intelectual (PATENTSCOPE). Existem, porém, outras bases que não são ligadas diretamente a um escritório nacional de patentes, como por exemplo o Google Patents, Lens e *Derwent*

Innovation Index. Para este trabalho, foram realizadas buscas na base do USPTO e no *Derwent Innovation Index*. A USPTO é uma base de dados gratuita que contém mais de 11 milhões de patentes e pedidos de patente depositadas desde 1796 (AGÊNCIA USP DE INOVAÇÃO, 2016), além de estar vinculada a uma das maiores economias globais. A base permite pesquisa avançada nos dados bibliográficos dos documentos e fornece o acesso ao texto completo. É possível, ainda, pesquisar pedidos de patente e patentes concedidas de forma separada. Já a *Derwent Innovation Index* é bem abrangente em relação a patentes internacionais, uma vez que possui, em seu banco de dados, documentos de 50 órgãos emissores de patentes (THOMSON REUTERS, 2016).

Um outro mecanismo bastante utilizado para a divulgação de resultados de pesquisas tecnológicas é a publicação de artigos em periódicos pela comunidade científica. Sendo uma fonte confiável de informação de qualidade, o artigo é um veículo de transmissão de conhecimento que contribui para corroborar estudos existentes e inspira a busca por novas descobertas (PIZZANI *et al.*, 2008; BORSCHIVER; SILVA, 2016). Existe uma variedade de bases de artigos, no entanto a base Scopus foi selecionada para este trabalho. Scopus é um dos maiores bancos de dados de resumos e citações de literatura científica e possui ferramentas inteligentes para a análise das pesquisas, possibilitando uma visão mais abrangente sobre a produção científica do mundo (BORSCHIVER; SILVA, 2016).

Depois da coleta direcionada de documentos, foi necessária a análise dos resultados de forma esquematizada para posterior confecção do *Roadmap*. Esta fase do estudo, portanto, foi sistematizada para a extração de informação útil através da definição de taxonomias. A metodologia de Borschiver e Silva (2016) sugere a segmentação desta etapa em três níveis:

- Análise Macro: são destacados os conteúdos mais amplos dos documentos, como anos de publicação, países de origem dos documentos e dos autores, o tipo de *player* do mercado envolvido (centros de pesquisa, universidades, empresas etc.).
- Análise Meso: as informações relevantes dos documentos são divididas por meio de taxonomias ou *drivers*, a fim de se identificar as tendências tecnológicas e mercadológicas.
- Análise Micro: cada taxonomia da análise Meso é subdividida em classificações mais detalhadas a partir de particularidades identificadas.

Portanto, de acordo com os aspectos mais importantes encontrados dos documentos estudados na etapa prospectiva, as taxonomias utilizadas na análise Meso e Micro são mostradas a seguir.

Tabela 1: Taxonomias Meso e Micro

Meso	Descrição	Micro
Pré-Tratamento	Refere-se a informações de etapas de tratamento do resíduo plástico antes do seu processamento no reator de pirólise	Separação
		Lavagem/limpeza
		Trituração
		Pré-aquecimento/fusão
Matérias-primas	Refere-se às matérias-primas empregadas na produção de combustível pela pirólise de resíduos plásticos.	Resíduos de plásticos puros
		Mistura de resíduos plásticos
		Caracterização
Processo	Refere-se a etapas e tecnologias do processo de pirólise.	Parâmetros e condições de processo
		Pirólise térmica
		Pirólise catalítica
Produtos	Refere-se aos possíveis produtos de um processo de pirólise.	Óleo de pirólise
		Gás de pirólise
		Char
		Diesel de pirólise
		Gasolina de pirólise
		Querosene de pirólise
		Outros produtos reciclados
		Caracterização
Insumos do processo	Refere-se a equipamentos e suprimentos necessários para o funcionamento de uma planta de pirólise.	Reator
		Catalisador
		Energia fornecida ao sistema de pirólise
		Equipamentos acessórios
Pós- tratamentos	Refere-se a informações de etapas de tratamento e/ou separação das correntes de saída do reator de pirólise para o fornecimento do produto final.	Destilação
		Misturas
		Outros pós-tratamentos

Fonte: Elaboração própria

Cabe mencionar que a Micro “Parâmetros e condições de processo” refere-se a trabalhos que não necessariamente explicitam a pirólise como térmica ou catalítica. O foco desta classificação baseia-se em critérios de processos, como a cinética, temperatura da reação e condições atmosféricas, por exemplo.

Na última etapa, Pós-prospectiva, as informações avaliadas foram organizadas na forma de *Roadmap*, destacando visualmente os aspectos mais relevantes do estudo, como as relações existentes entre as informações coletadas. O modelo adotado para o trabalho compreende uma representação gráfica baseada no tempo e em um número de camadas e subcamadas que incluem perspectivas tecnológicas.

3.2 PESQUISA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS

A busca pelos artigos foi baseada na utilização das palavras-chaves “*pyrolysis*”, “*feedstock recycling*”, “*chemical recycling*”, “*plastic waste*” e “*waste plastic*”, excluindo-se tecnologias que também são classificadas como reciclagem química, porém não são objeto de estudo deste trabalho (“*depolimerization*”, “*gasification*”, “*partial oxidation*”, “*catalitic cracking*”, “*catalitic reforming*”, “*hydrogenation*”, “*hydrothermal treatment*”). Optou-se pela pesquisa de artigos publicados nos últimos cinco anos (2017 a setembro de 2021), uma vez que, para a realização de uma prospecção tecnológica, é necessária a obtenção de documentos mais recentes. Dessa forma, a estratégia de busca e a quantidade total de artigos resultantes encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2: Estratégia de busca de artigos na base Scopus

Busca Avançada por Palavras-chave	Total de Documentos
<p>(TITLE-ABS (<i>pyrolysis*</i> OR (<i>"feedstock* recycling*"</i> AND NOT (<i>depolimerization*</i> OR <i>gasification*</i> OR <i>"partial oxidation"</i> OR <i>"catalitic* cracking*"</i> OR <i>"catalitic* reforming*"</i> OR <i>hydrogenation*</i> OR <i>"hydrothermal* treatment*"</i>)) OR (<i>"chemical* recycling*"</i> AND NOT (<i>depolimerization*</i> OR <i>gasification*</i> OR <i>"partial oxidation"</i> OR <i>"catalitic* cracking*"</i> OR <i>"catalitic* reforming*"</i> OR <i>hydrogenation*</i> OR <i>"hydrothermal* treatment*"</i>))) OR AUTHKEY (<i>pyrolysis*</i> OR (<i>"feedstock* recycling*"</i> AND NOT (<i>depolimerization*</i> OR <i>gasification*</i> OR <i>"partial oxidation"</i> OR <i>"catalitic* cracking*"</i> OR <i>"catalitic* reforming*"</i> OR <i>hydrogenation*</i> OR <i>"hydrothermal* treatment*"</i>)) OR (<i>"chemical* recycling*"</i> AND NOT (<i>depolimerization*</i> OR <i>gasification*</i> OR <i>"partial oxidation"</i> OR <i>"catalitic* cracking*"</i> OR <i>"catalitic* reforming*"</i> OR <i>hydrogenation*</i> OR <i>"hydrothermal* treatment*"</i>))) AND TITLE-ABS (<i>"plastic* waste*"</i> OR <i>"waste* plastic*"</i>)) AND DOCTYPE (<i>ar</i>) AND PUBYEAR > 2016</p>	612

Fonte: Elaboração própria

A escolha destas palavras-chaves teve como principal objetivo selecionar o maior número de artigos que abordassem a pirólise de resíduos plásticos. O resultado obtido foi de 612 documentos publicados nos últimos cinco anos. Nesse sentido, foi adotada a estratégia de utilizar todos os artigos para a análise Macro, tendo em vista que é possível obter um melhor panorama ao realizar análises mais assertivas em relação ao ano, países e instituições. No entanto, uma vez que as demais análises exigem uma leitura mais aprofundada de cada documento, somente os 50 artigos mais relevantes sobre o tema - segundo o critério de relevância da base Scopus - e que abordassem a pirólise para a produção de combustíveis, no período de 01/2017 a 09/2021, foram examinados.

3.3 PESQUISA DE PATENTES DEPOSITADAS

O levantamento das informações sobre patentes depositadas foi realizado, primeiramente, na base do USPTO. A estratégia da busca e o total de patentes resultantes são mostrados na Tabela 3. A pesquisa foi realizada em novembro de 2021 e foi considerado como critério de análise o número de patentes depositadas nos últimos cinco anos (2017 a novembro de 2021).

Para complementar a busca realizada, foi utilizada a mesma estratégia de tempo e palavras-chaves na base de dados *Derwent Innovations Index*. Cabe ressaltar que esta última não separa a pesquisa em patentes concedidas e solicitadas. Entretanto, pelo código da patente, a separação pôde ser feita, dado que, de forma geral, o código A (*kind code*) denota que o documento ainda é um pedido de patente e o código B representa uma patente concedida, para a maioria dos países.

Tabela 3: Estratégia de busca de patentes depositadas

Base	Busca Avançada por Palavras-chave	Total de Documentos
USPTO	<i>TTL/pyroly\$ AND ("plastic waste" OR "waste plastic")</i>	82
<i>Derwent Innovations Index</i>	<i>TS=pyrolysis* AND TS = ("plastic* waste*" OR "waste* plastic*")</i>	390

Fonte: Elaboração própria

A escolha destas palavras-chaves teve como objetivo selecionar o maior número possível de patentes que abordassem o tema, sendo excluídos os termos “*feedstock*

recycling" e "*chemical recycling*" por estarem resultando em outras tecnologias sem ser a de foco desse estudo.

Entre os documentos mais relevantes, segundo os critérios das bases USPTO e *Derwent Innovations Index*, e que abordaram sobre combustíveis, foram selecionados 33 pedidos de patentes para análise.

3.4 PESQUISA DE PATENTES CONCEDIDAS

O levantamento das informações sobre patentes concedidas foi realizado de maneira análoga às depositadas. A estratégia da busca e o total de patentes resultantes são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Estratégia de busca patentes concedidas

Base	Busca Avançada por Palavras-chave	Total de Documentos
USPTO	<i>TTL/pyroly\$ AND ("plastic waste" OR "waste plastic")</i>	50
<i>Derwent Innovations Index</i>	<i>TS=pyrolysis* AND TS = ("plastic* waste*" OR "waste* plastic*")</i>	390

Fonte: Elaboração própria

Foram selecionadas 27 patentes concedidas, seguindo os mesmos critérios de seleção das patentes depositadas.

3.5 PESQUISA DO ESTÁGIO ATUAL

O estágio atual do *Roadmap Tecnológico* explora os *players* que utilizam as tecnologias já desenvolvidas no setor avaliado. As buscas por esses atores da indústria foram realizadas nos endereços eletrônicos das empresas, sendo estas selecionadas a partir dos resumos de relatórios de mercado e artigos da *McKinsey & Company* (2021), *Lux Research* (2021) e *IHS Markit* (2021). Entre todas as empresas destacadas nesses relatórios, escolheu-se treze que potencialmente atuam no setor de reciclagem química para a produção de combustíveis ou outros produtos derivados do óleo de pirólise para uma análise mais aprofundada.

Uma pesquisa direcionada ao mercado brasileiro também foi realizada, porém somente a Braskem foi considerada, uma vez que as pequenas empresas recicladoras encontradas desenvolvem tecnologias de coprocessamento de resíduos, tendo como matérias-primas os resíduos sólidos urbanos de modo geral, sem foco nos plásticos.

4. ETAPA PRÉ-PROSPECTIVA

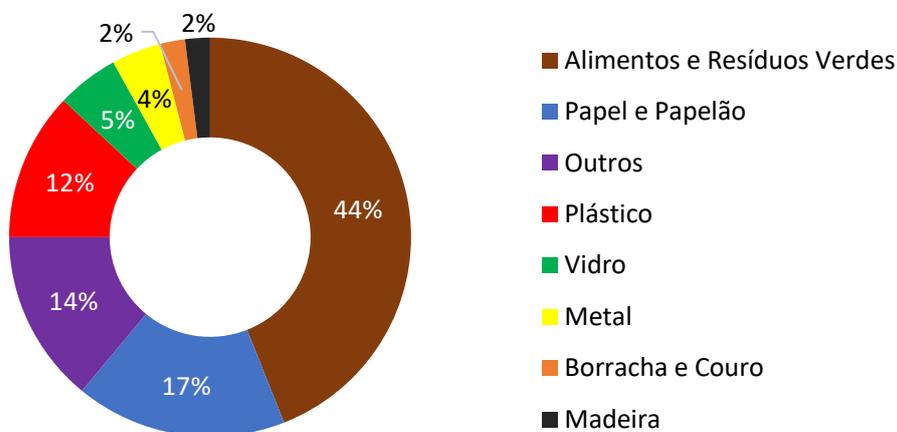
4.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

4.1.1 Panorama Mundial

De acordo com dados do Banco Mundial (2018), espera-se que os níveis globais de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) aumentem de 2,01 bilhões de toneladas em 2016 para 3,40 bilhões toneladas em 2050. O pensamento de que a tecnologia é a solução para o problema de desperdício não gerenciado e crescente é limitado e o desenvolvimento tecnológico deve ser analisado como um fator importante no gerenciamento de resíduos sólidos, porém não o único. Nesse sentido, a coleta de lixo mostra-se como uma etapa crítica na gestão de resíduos, com as taxas variando em grande parte por níveis de renda, com países de renda média-alta e alta fornecendo coleta de pelo menos 90% dos resíduos, enquanto em países subdesenvolvidos coleta-se cerca de 48% dos resíduos nas cidades, mas essa proporção cai drasticamente para 26% fora das áreas urbanas (KAZA *et al.*, 2018).

A composição gravimétrica dos resíduos também difere entre os níveis de renda dos países, refletindo padrões variados de consumo. Sobre uma perspectiva global, a maior categoria de resíduos são alimentos e resíduos verdes, representando 44% dos resíduos globais (Figura 1). Recicláveis secos - plástico, papel e papelão, metal e vidro - equivalem a 38% dos resíduos (KAZA *et al.*, 2018).

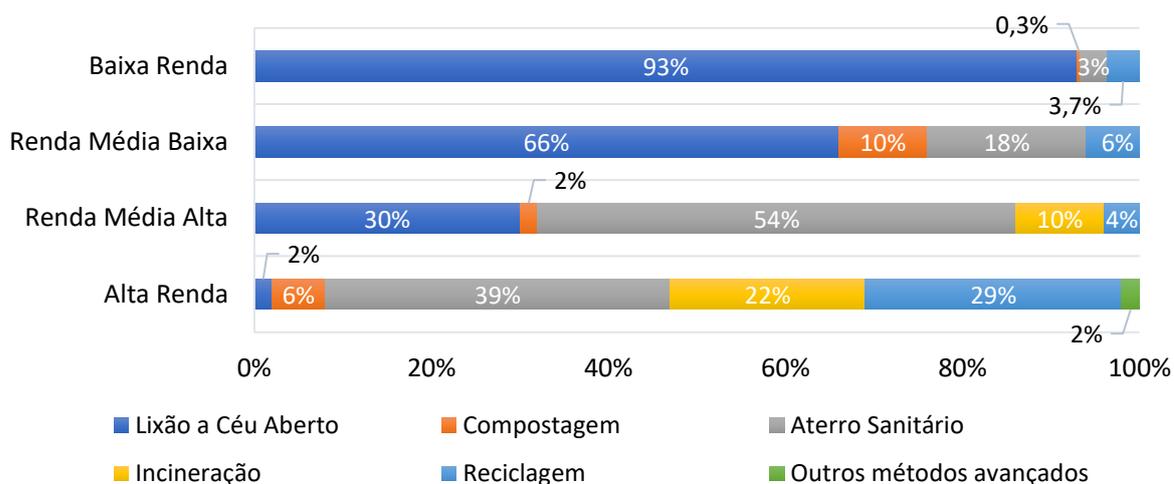
Figura 1: Composição gravimétrica dos RSU – dados globais (2016)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do World Bank Group (2018)

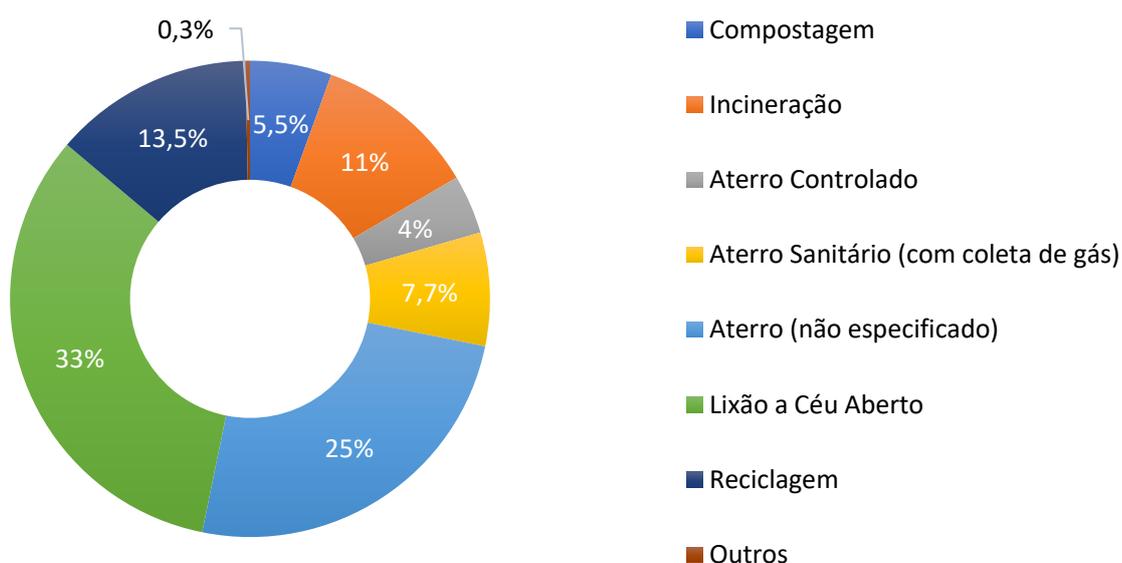
Sobre a disposição final, a maior parte dos RSU atualmente é descartada em aterros sanitários. No entanto, os países desenvolvidos avançam na eliminação ou tratamento adequado de resíduos, enquanto os países de mais baixa renda ainda dependem dos lixões a céu aberto (Figura 2). A Figura 3 mostra a participação percentual de cada tipo de tratamento e disposições finais do lixo empregados globalmente (KAZA *et al.*, 2018).

Figura 2: Métodos de descarte por renda dos países (2016)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do World Bank Group (2018)

Figura 3: Tratamento e descarte de resíduos – dados globais (2016)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do World Bank Group (2018)

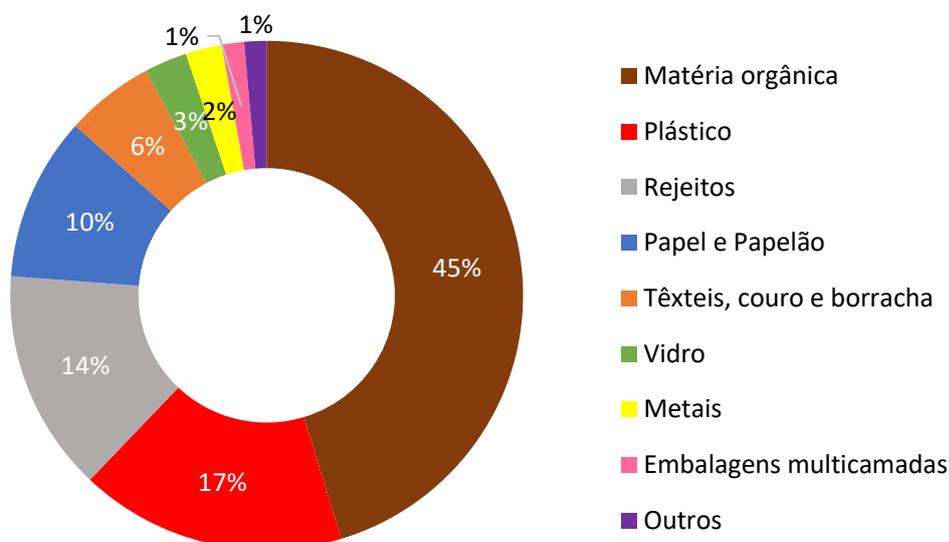
4.1.2 Panorama Brasileiro

Entre 2010 e 2019, o Brasil registrou uma maior geração de RSU, aumentando de 67 milhões de toneladas para 79 milhões de toneladas por ano. Em contrapartida, a coleta dos resíduos foi expandida em todas as regiões do país, passando de uma cobertura de 88% para 92% em uma década (ABRELPE, 2020).

Em relação à composição gravimétrica, a fração orgânica ainda permanece como a principal componente dos RSU brasileiros, correspondendo a 45,3%. Os resíduos recicláveis secos representam 35%, sendo compostos por plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), além dos vidros (2,7%), metais (2,3%) e embalagens multicamadas (1,4%), como pode ser analisado na

Figura 4.

Figura 4: Gravimetria dos RSU no Brasil (2019)

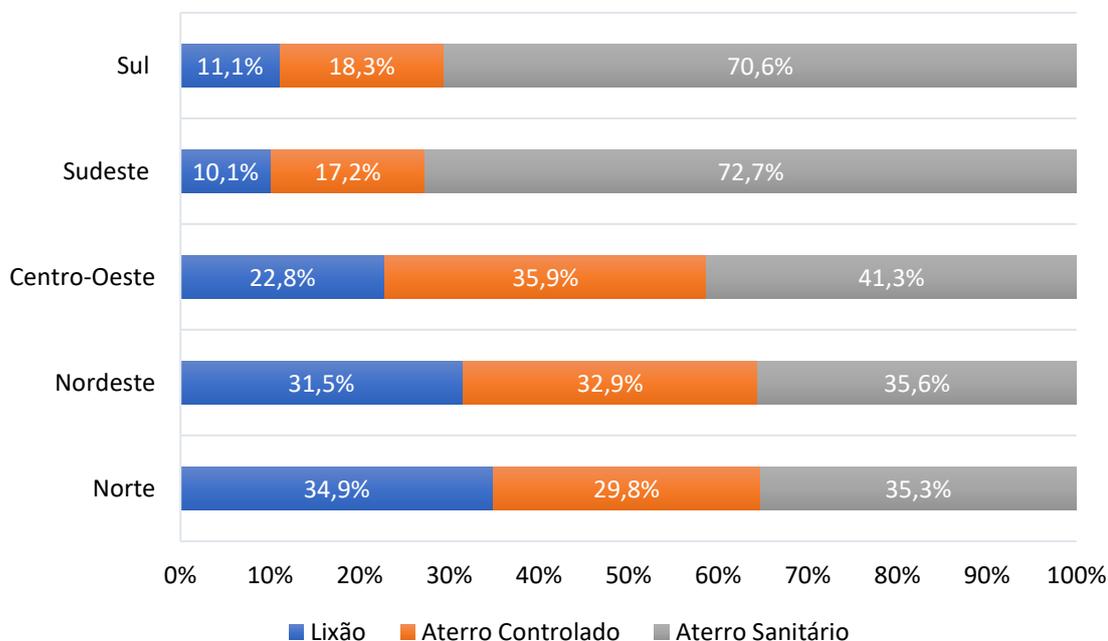


Fonte: Elaboração própria com base em dados da ABRELPE (2020)

No país, a maior parte dos resíduos coletados tem como disposição final os aterros sanitários, tendo sido registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década. No entanto, a quantidade de resíduos que foram descartados em unidades inadequadas (lixões e aterros controlados) também cresceu (ABRELPE, 2020). Seguindo as tendências mundiais, a disposição final dos RSU acompanha os padrões de renda entre as regiões do país, conforme

mostrado na Figura 5, onde é indicado um maior percentual da disposição adequada nas regiões Sul e Sudeste, de maior renda.

Figura 5: Disposição final de RSU nas regiões, por tipo de destinação no Brasil (2019)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da ABRELPE (2020)

Apesar de avanços na disposição adequada, a incipiência da coleta seletiva no país e a falta de separação dos resíduos abarbam os sistemas de destinação final, muitos já próximos ao esgotamento. Como consequência, os índices de reciclagem permanecem estagnados, apesar de promoções do setor. Em uma década de PNRS, somente os materiais que tinham a obrigatoriedade de reciclagem antes da promulgação da Lei apresentam índices satisfatórios. Portanto, as informações apresentadas corroboram com o fato de que a redução da geração, a implementação de logística reversa, o aumento da recuperação de materiais e a disposição final em aterros apenas para os rejeitos, ainda estão longe de ser uma realidade brasileira. Como possíveis causas, pode-se citar a falta de reconhecimento da importância do gerenciamento de resíduos e a deficiência de instrumentos econômicos/tributários para estimular as melhores práticas (ABRELPE, 2020). Nesse contexto, o setor deve ser objeto de atenção prioritária para se obter os avanços planejados pela Lei.

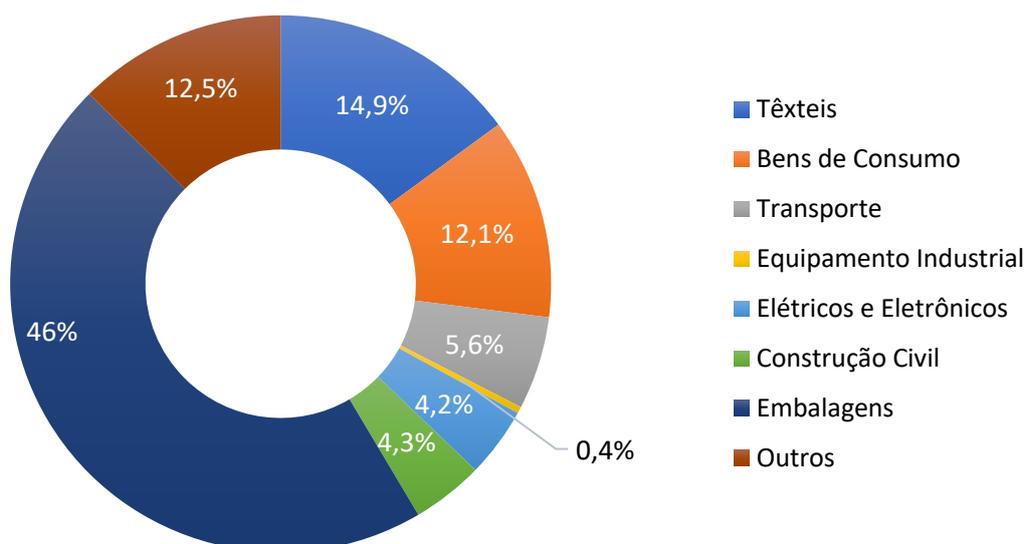
4.2 RESÍDUOS PLÁSTICOS

4.2.1 Fontes e tipos de resíduos plásticos

Os resíduos plásticos podem ser classificados principalmente em duas categorias: resíduos plásticos pré-consumo ou industriais; e resíduos plásticos pós-consumo. Os resíduos plásticos pré-consumo são gerados durante a fabricação de plástico virgem a partir das matérias-primas e da conversão de plásticos em produtos finais. Essa categoria geralmente representa menos de 10% da geração total. A maioria dos resíduos plásticos vem do mercado pós-consumo (UNEP, 2020).

Os resíduos pós-consumo são encontrados principalmente nos RSU, bem como nos setores têxtil, agrícola, construção civil, automotivo, eletrônico e elétrico. As embalagens plásticas contribuem com a maior participação no mercado de produtos desse material e tem como principal característica uma vida útil muito curta. Consequentemente, é também um dos principais setores de geração de resíduos plásticos, correspondendo a 46% do total (Figura 6) (UNEP, 2020).

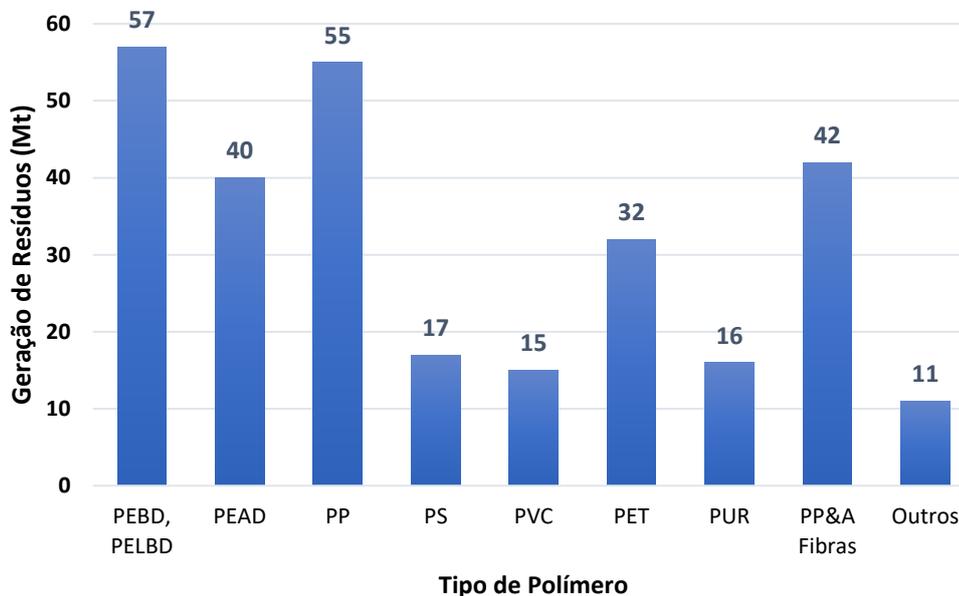
Figura 6: Geração de resíduos plásticos por setor – dados globais (2018)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da UNEP (2020)

Em relação aos tipos de *commodities* poliméricas que são descartadas, temos, na Figura 7, a referência dos dados globais de 2015:

Figura 7: Geração total de resíduos dos polímeros mais comuns – dados globais (2015)



Fonte: Elaboração própria com base dados do DOE (2021)

(PEAD: polietileno de alta densidade; PEBD: polietileno de baixa densidade; PELBD: polietileno linear de baixa densidade; PET: tereftalato de polietileno; PP: polipropileno; PP&A: poliéster, poliamida e acrílico; PS: poliestireno; PUR: poliuretano; PVC: cloreto de polivinila)

4.2.2 Panomara Mundial

O crescimento da produção de plásticos levou a uma geração significativa desse tipo de resíduo, resultando na incapacidade da sociedade em gerenciá-lo de forma eficaz. As taxas de geração de RSU são influenciadas, em geral, por fatores como desenvolvimento econômico, grau de industrialização e hábitos de consumo. Esses parâmetros também são levados em consideração para estimar a geração de resíduos plásticos em diversos países do mundo. Nesse sentido, existem algumas estimativas, com base na literatura, que podem ser destacadas.

O Banco Mundial, conforme apresentado na Seção 3.1.1, estimou que, em 2016, o mundo gerou 242 milhões de toneladas de resíduos plásticos, representando 12% de todos os

resíduos sólidos urbanos (KAZA *et al.*, 2018). Já Geyer (2020) avaliou que cerca de 343 milhões de toneladas de resíduos plásticos são produzidos por ano. Segundo Jambeck *et al.* (2015) e Geyer *et al.* (2017), das 8,3 bilhões de toneladas de plástico que foram introduzidas no mercado entre 1950 e 2015, 5,8 bilhões de toneladas de resíduos plásticos foram gerados, dos quais 12% foram incinerados, 9% reciclados e cerca de 60% descartados em aterros ou no meio ambiente. Ainda de acordo com os autores, até 2015, menos de 20% dos resíduos plásticos foram reciclados anualmente. Desde então, a reciclagem e a incineração de resíduos plásticos continuaram aumentando, porém uma quantidade ainda significativa é descartada em aterros ou lixões (56%) (UNEP, 2020).

Com o surgimento de um novo vírus em 2019, o SARS-CoV-2 - que resultou na categorização da doença COVID-19 como uma pandemia pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em março de 2020 -, o mundo se deparou com a necessidade de eliminar o contágio através de equipamentos de proteção pessoal, como máscaras, luvas, roupas de proteção descartáveis, tornando o uso desses materiais obrigatório na maioria dos países. Com isso, as demandas por EPI aumentaram exponencialmente, o que levou a uma maior geração subsequente de resíduos plásticos (JUNG *et al.*, 2020). De acordo com Peng *et al.* (2021), a quantidade de resíduos plásticos gerados em decorrência da pandemia em todo o mundo desde o surto é estimada em 8,4 milhões de toneladas. Com isso, o quadro já crítico de geração de resíduos foi agravado, levando à necessidade de maior atenção a essa problemática.

4.2.3 Panorama Brasileiro

De acordo com dados do Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana (SELURB), das 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos produzidas por ano no Brasil, 13,5% são plásticos. Isso faz com que o país seja o quarto maior produtor de lixo plástico do mundo, com 10,7 milhões de toneladas de plástico por ano (ATLAS DO PLÁSTICO, 2020).

O maior desafio para o país está na gestão desse tipo de resíduo, uma vez a quantidade de derivados de plástico produzido não é devidamente tratada. Os números indicam que, das 3,4 milhões de toneladas de resíduo plástico pós-consumo geradas, 757,6 mil toneladas de resina plástica pós-consumo foram produzidas em 2018 no Brasil, indicando um índice de reciclagem de 22,1% (ABIPLAST, 2019). Isso significa que ainda há uma grande parcela de resíduos plásticos que é dispensada no ambiente e não é reintroduzida na cadeia produtiva, como também é verificado no panorama mundial.

4.3 RECICLAGEM DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

Diante do cenário apresentado, a proliferação da produção de plásticos e resíduos representa uma crescente crise ambiental. A reciclagem de plásticos surge, então, como uma alternativa para a reintrodução do material na cadeia produtiva, aumentando o ciclo de vida do produto e contribuindo com a sustentabilidade na indústria.

O processo de reaproveitamento do material, como já explicado, é abordado no mercado global principalmente por três métodos: mecânico, químico e energético. Cada um destes inclui diversas abordagens tecnológicas, com suas vantagens e desvantagens. Nesse sentido, a recuperação de plásticos, na forma de material ou de energia, apresenta grandes variações entre países e regiões, bem como entre os tipos de polímeros.

No Brasil há um crescente aumento do índice de reciclagem, mesmo com as limitações de coleta seletiva fora dos grandes centros urbanos. No entanto, esta atividade no país está restrita apenas à reciclagem mecânica, sendo necessário evoluir também na reciclagem energética e na química.

4.3.1 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é o método mais usado para tratar resíduos plásticos. É definida como o reprocessamento de matérias-primas ou produtos secundários sem alterar significativamente a estrutura química do material (UNEP, 2020). Normalmente, o produto da reciclagem do plástico é utilizado para a produção de novas embalagens, mangueiras e peças de automóveis, por exemplo. Como apenas os polímeros termoplásticos podem ser aproveitados por esta tecnologia, é mais empregada para poliolefinas (PE e PP) (BRASKEM, 2019).

O processo inclui as etapas de coleta, triagem, reprocessamento e aproveitamento final do resíduo reciclado. Na fase de coleta e separação, o material é recolhido, classificado e separado por propriedades físicas - esta classificação pode ser manual ou mecânica/automática. Após isso, o plástico passa por processos mecânicos de empacotamento e/ou moagem. Os produtos, então, são encaminhados para limpeza e secagem, seguindo para etapas de reprocessamento, que consistem em aglutinação, extrusão e resfriamento. Dessa forma, formam-se grânulos que servem como matérias-primas para novos plásticos (BRASKEM, 2019).

4.3.2 Reciclagem Energética

A reciclagem energética é o processo de utilização de resíduos plásticos como substitutos dos recursos primários fósseis para a produção de energia na forma de calor ou eletricidade, aproveitando o poder calorífico contido nesses materiais. Este tipo de reciclagem, portanto, mostra-se como uma alternativa para a diversificação da matriz energética e contribui para a otimização dos espaços em locais onde não há áreas livres para a criação de aterros sanitários, como ocorre em muitas regiões da Europa e Japão (BRASKEM, 2019). Também pode ser considerada uma boa alternativa para plásticos não recicláveis mecanicamente.

Cabe destacar que esta solução demanda o engajamento do poder público, uma vez que não é uma tecnologia economicamente sustentável. No entanto, tornou-se uma solução ambientalmente viável ao se utilizar catalisadores para reter a emissão de poluentes (BRASKEM, 2019). Dessa forma, a reciclagem energética requer um alto custo de investimento e de operação pela utilização de sistemas de limpeza modernos adequados para evitar o aumento das emissões atmosféricas e capazes de tratar adequadamente os particulados. Em outras condições, esta não poderia ser considerada uma alternativa ambientalmente aceitável para o tratamento de plásticos (UNEP, 2020).

4.3.3 Reciclagem Química

A reciclagem química é definida, de acordo com a ISO 15270 (2008), como a “conversão de monômeros ou produção de novas matérias-primas alterando a estrutura química de resíduos plásticos por meio de craqueamento, gaseificação ou despolimerização, excluindo recuperação de energia e incineração.” Dessa forma, os monômeros resultantes podem ser usados em novas polimerizações para reproduzir o produto original ou outros relacionados. É perceptível, portanto, que este tipo de reciclagem é considerado o processo mais complexo dos três.

A tecnologia não está totalmente desenvolvida, pois requer muito investimento e mão-de-obra especializada. No entanto, é visto como um método de reciclagem de plásticos promissor e espera-se que a capacidade de instalação em todo o mundo aumente. Nesse cenário, vários métodos de reciclagem - como os de gaseificação e pirólise - estão sendo estudados para se estabelecer as condições adequadas de processo. Apenas tecnologias de despolimerização, como metanólise e glicólise, são reconhecidas como rotas tecnicamente

viáveis para converter polímeros de condensação como PET, policarbonato, poliéster, poliuretano e náilon em produtos químicos básicos, como etilenoglicol e ácido tereftálico (UNEP, 2020).

De acordo com a Braskem (2019), a reciclagem química deve ser adotada para plásticos que não são fáceis de se recuperar energeticamente ou mecanicamente, em vez de substituir as opções mecânica e energética, por ser mais complexa e necessitar de um desenvolvimento tecnológico maior. Destaca-se, ainda, que a tecnologia requer grandes quantidades de plástico para ser economicamente viável. Nesse cenário, devido aos altos custos de capital e conhecimentos técnicos necessários, é mais difícil de ser adotada em países em desenvolvimento. De acordo com Kumar *et al.* (2019), as tecnologias desse tipo aparecem principalmente em algumas regiões desenvolvidas, como os EUA e a Europa.

4.3.4 Desafios da reciclagem de plásticos

Embora haja avanços nas tecnologias mencionadas anteriormente, a reciclagem de plásticos enfrenta muitos desafios, entre eles as misturas plásticas e os altos níveis de contaminação. Nesse cenário, o custo-benefício e a eficiência do processo de reciclagem de misturas é talvez o maior desafio que este segmento enfrenta. Segundo a UNEP (2020), a qualidade da reciclagem é influenciada, principalmente, pelo grau de mistura (contaminação cruzada entre polímeros), grau de degradação e pelos níveis de contaminação.

As misturas de plásticos não acarretam tantos problemas no reprocessamento quando os contaminantes são da mesma família do polímero principal e estão presentes em proporções pequenas. No entanto, a maioria dos polímeros não são compatíveis entre si, resultando em uma mistura que possui uso comercial limitado - devido às propriedades mecânicas inadequadas - quando processados juntos (UNEP, 2020).

A contaminação da reciclagem de plástico ocorre quando materiais inadequados são adicionados ao sistema de reciclagem. A exemplo disso, temos a contaminação por plásticos não recicláveis e por materiais não poliméricos, como metais, papel, vidro, areia, cerâmica, borracha, matéria orgânica, além dos óleos, solventes, tintas, gorduras ou detergentes que podem ser adsorvidos pelo plástico (UNEP, 2020).

Cabe mencionar que os aditivos também podem ser considerados como um tipo de contaminação do plástico na indústria de reciclagem. Embora o papel destas substâncias seja melhorar o desempenho do produto, permitindo o processamento ou conferindo certas

propriedades desejadas para uma aplicação específica, eles também podem representar um desafio devido às suas propriedades potencialmente perigosas e efeitos imprevisíveis em contato com outros produtos (UNEP, 2020).

Por fim, é válido destacar a questão dos resíduos de plásticos de base biológica (*bio-based*). Quando as aplicações e o mercado desse tipo de material aumentarem, haverá também um crescimento de sua presença na cadeia produtiva e, portanto, estes entrarão nos processos de reciclagem estabelecidos para plásticos de origem fóssil. Como a triagem, em sua maioria, é baseada na diferenciação visual, isso faria com que os *bio-based* fossem tratados nas mesmas unidades, junto com os resíduos poliméricos convencionais, resultando em problemas para a unidade de reprocessamento, uma vez que estes materiais têm propriedades físicas e química bastante diferentes (UNEP, 2020).

4.4 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM QUÍMICA

As tecnologias de reciclagem química não são novas, entretanto, recentemente, a indústria está dando uma maior atenção para o assunto. De acordo com a ISO 15270 (2008), os principais métodos de reciclagem química, que se diferem em termos de entrada de resíduos e produtos obtidos, são:

- Despolimerização: transforma os polímeros de condensação (por exemplo, PET) em monômeros, que podem ser polimerizados formando novos produtos.
- Solvólise: quebra certos plásticos, como o poliuretano, em menores partes com o auxílio de solventes.
- Pirólise (ou termólise): converte misturas de plásticos, em uma atmosfera inerte, em óleo de pirólise, que pode ser quebrada e posteriormente refinada para a produção de novos plásticos ou combustíveis.
- Gaseificação: processa resíduos plásticos misturados e transforma-os em gás de síntese, que pode ser usado como *building block* para novos produtos químicos.

Os dois últimos métodos transformam os polímeros de volta em produtos químicos básicos por decomposição térmica em temperaturas elevadas e, por isso, se mostram como as tecnologias mais interessantes quando o assunto é a geração de combustíveis a partir destes materiais. Neste trabalho serão estudadas tecnologias de pirólise, ficando o estudo de gaseificação como proposta de trabalhos futuros. As principais tecnologias dessa área serão apresentadas nos subitens a seguir.

4.4.1 Pirólise Térmica

No processo de pirólise, os plásticos são decompostos em uma variedade de hidrocarbonetos básicos a altas temperaturas na ausência de oxigênio. Os produtos podem ser gasosos (gás de pirólise), líquidos (óleo de pirólise) e sólidos residuais (*char*) em quantidade bastante variável. Utilizando um processo de destilação, o vapor de hidrocarboneto pode ser transformado em produtos que variam de cera e óleos pesados, a óleos leves e gás. É possível manipular a produção de mais pesada para mais leve ajustando condições de operação, como o tempo de processo e a temperatura (British Plastics Federation, 2019).

Uma das classificações mais tradicionais do processo de pirólise tem como base as taxas de aquecimento. A pirólise lenta (não isotérmica) ocorre pelo aquecimento gradual da matéria-prima (taxas de 10 °C/s) na ausência de oxigênio. Em vez de entrar em combustão, os voláteis evaporam parcialmente, permanecendo o carvão, sendo constituído principalmente de carbono (normalmente 80%). Este processo também é chamado de carbonização e tem o carvão sólido como produto principal (EZE *et al.*, 2021).

Já a pirólise rápida ocorre pelo aquecimento rápido da matéria-prima a temperaturas moderadas (400-600 °C) em um curto tempo de residência para o favorecimento da produção de óleo de pirólise. Nesse sentido, a pirólise rápida fornece condições para maximizar os produtos líquidos pela utilização de um reator que opera com uma taxa de aquecimento de 100 °C/s até a temperatura de reação, quando, então, é considerado isotérmico. Este é o método mais comumente empregado (EZE *et al.*, 2021).

Por fim, a pirólise ultrarrápida ou *flash* é um processo de decomposição térmica extremamente rápida, com altas taxas de aquecimento (variando de 100 a 10.000 °C/s) e tempos de residência reduzidos. Têm como principais produtos os gases e o óleo (EZE *et al.*, 2021).

4.4.1.1 Influência da carga polimérica no produto

A produção da reação pirolítica está intimamente ligada à carga polimérica processada. Nesse contexto, a Tabela 5, baseada no trabalho de Buekens (2006), apresenta os produtos principais da pirólise de plásticos comercialmente relevantes. Como resultado, o autor destacou que a distribuição de produtos sofre influência do tempo de residência e das taxas de quebra de ligação, que ocorrem mais facilmente sob altas temperaturas.

Tabela 5: Polímeros e principais produtos da decomposição térmica de plásticos.

Polímero	Produtos a baixas temperaturas (< 600 °C)	Produtos a altas temperaturas (> 600 °C)
PE (polietileno)	Graxas, parafinas e α -olefinas	Gases e óleos leves
PP (polipropileno)	Vaselina e olefinas	Gases e óleos leves
PVC (policloreto de vinila)	HCl (< 300°C), benzeno	Tolueno (> 300°C)
PS (poliestireno)	Estireno e seus oligômeros	Estireno e seus oligômeros
PET (politereftalato de etileno)	Ácido benzoico, ácido tereftálico e etileno glicol	Ácido benzoico, ácido tereftálico e etileno glicol
PMMA (Polimetacrilato de metila)	MMA (metacrilato de metila)	Menores quantidade de MMA, e mais decomposição
PTFE (politetrafluoretileno)	TFE (tetrafluoretileno)	TFE (tetrafluoretileno)

Fonte: Adaptado de Buekens (2006)

Ademais, muitos trabalhos realizados mostram que a estrutura química dos polímeros na carga de entrada do processo afeta as propriedades dos produtos obtidos. Nesse sentido, Monteiro (2018) apresentou um resumo dos efeitos de carga no produto final da pirólise, baseado nos principais estudos na área (Tabela 6):

Tabela 6: Efeitos da carga polimérica no produto de pirólise

Carga	Efeito no produto
Maior quantidade de PE	Aumenta a quantidade de alcanos
	Maior formação de gás
	Menor formação de líquido
	Maior formação de parafinas
	Maior formação de eteno e butadieno
Maior quantidade de PP	Aumenta a quantidade de alcenos
	Aumenta a octanagem do produto
	Forma menores quantidade de graxas
	Aumenta a quantidade de voláteis
	Aumenta a quantidade de olefinas e naftenos
Maior quantidade de PS	Aumenta a quantidade de aromáticos
	Aumenta a octanagem do produto
	Diminui a produção de gás
	Aumenta a quantidade de líquido
Problemas da carga no produto	Presença de organoclorados: afetam a qualidade do produto e a operação da planta; corrosão pela formação de HCl; entupimento por conta da formação de CaCl ₂ .
	Presença de enxofre e de nitrogênio
	Presença de aditivos

Fonte: Monteiro (2018)

4.4.1.2 Influência da temperatura no produto

Segundos alguns estudos, como os de Monteiro (2018), López *et al.* (2011), Miskolczi *et al.* (2004) e Demirbas (2004), o aumento da temperatura favorece o craqueamento de ligações C-C e, assim, aumentam-se as concentrações de H₂, CH₄ e eteno na fração gasosa e de aromáticos na fração líquida. Em contrapartida, menores quantidades de CO, propeno, CO₂, C₅ e de C₆ no gás e de graxas no líquido são observadas com a elevação deste parâmetro. De forma geral, o aumento da temperatura também proporciona um aumento da octanagem do produto.

4.4.1.3 Influência do tempo de residência no produto

O tempo de residência está relacionado à temperatura de reação (BUEKENS, 2006). Nesse sentido, a formação dos produtos primários é favorecida por menores tempos e a dos produtos mais estáveis termodinamicamente - H₂, CH₄, aromáticos, carbono - é determinada

por tempos mais longos. Portanto, pode-se concluir que o aumento do tempo de residência proporciona o aumento das taxas de degradação e geração de produtos mais estáveis e resultantes de reações secundárias (MONTEIRO, 2018).

4.4.1.4 Tipos de reatores de pirólise

De acordo com Buekens (2006), o tipo de reator é selecionado em função de suas características de transferência de calor, de alimentação e de geração de resíduos. Na maioria dos processos propostos, os polímeros são, primeiramente, dissolvidos em um banho de polímero fundido ou graxa, ou dispersos em um banho de sal, para reduzir a viscosidade do fluido em processamento. Outros processos sugerem o uso das excelentes propriedades de transferência de calor de mistura de reatores térmicos ou catalíticos de leito fluidizado. Alguns tipos de reatores estão sintetizados a seguir, na Tabela 7.

Tabela 7: Tipos de reatores e suas características.

Tipo de Reator	Características
Extrusora	Temperatura de operação limitada. É essencial que os produtos da decomposição sejam coletados antecipadamente.
Reator tubular	Reator simples.
Reator de mistura, com possível <i>loop</i> de aquecimento externo e/ou resfriamento	Reator de fase líquida convencional. A agitação melhora a transferência de calor. Deve-se evitar o entupimento dos dutos a jusante.
Reator vertical	Escoamento gravitacional.
Reator de leito fixo	Usado principalmente em reações catalíticas.
Reator com banho salino	O banho age como um agente de transferência de calor. Os resíduos se acumulam no topo da camada de sal, exigindo parada periódica para limpeza.
Reator de leito fluidizado	O leito age como um agente de transferência de calor, dispersando o plástico fundido em camadas finas. Os resíduos são carregados com os produtos, exigindo filtração rigorosa dos finos (pigmentos e preenchimentos).
Forno rotativo	Unidade simples, caracterizada por fluxo gravitacional.

Fonte: Monteiro (2018)

Normalmente, extrusoras têm capacidade de processar mais de 1 t/h, para misturar, fundir plásticos e, com isso, podem fornecer perfis, tubos, chapas etc. Este equipamento pode ser aquecido eletricamente ou utilizar óleo circulante e, normalmente, é usado em sistemas pirolíticos para alimentação de plásticos, onde promovem a deformação do material fundido, eliminando HCl do PVC em temperaturas de até 400 °C (BUEKENS, 2006).

Reatores tubulares constituem uma tecnologia convencional na Engenharia e têm como principal característica a manutenção da velocidade do fluido ao longo de sua seção transversal. Foram utilizados em alguns estudos em bancada e em escala industrial. Por exemplo, a BASF utilizou este tipo de reator para craqueamento de resíduos sólidos (MONTEIRO, 2018).

Reatores de mistura ou de tanque agitado (STR, em inglês) são um dos tipos de reatores mais utilizados para pirólise de plásticos (BUTTLER *et al.*, 2011). Os processos com STR podem utilizar fluidos de troca térmica e a agitação também contribui com a troca térmica e distribuição uniforme de calor. Entretanto, uma das grandes desvantagens do uso de reatores de tanque agitado é que demandam constante manutenção, sendo necessária a instalação de mais de um reator para uma produção eficiente em uma planta de pirólise (MONTEIRO, 2018).

Já o reator de leito fluidizado é o segundo tipo de reator mais utilizado para a pirólise de plásticos (BUEKENS, 2006). Isso porque os processos de craqueamento de poliolefinas em escala industrial devem ser realizados de forma contínua. Nesse sentido, a literatura apresenta muitas vantagens dos reatores de leito fluidizado para operações contínuas e em maiores escalas, como melhor taxa de transferência de calor para o plástico, além de possibilitar a dosagem contínua de catalisadores e a remoção contínua de coque. Entretanto, a fusão do material plástico impõe limitações ao uso desses reatores (MONTEIRO, 2018).

Por fim, reatores do tipo forno rotativo foram bastante usados para pirólise de resíduos plásticos no passado, principalmente para produção de vapores e resíduos que seguiam para gaseificação. No entanto, a qualidade do produto geralmente é baixa. Este tipo de reator é, então, mais utilizado na pirólise de resíduos de pneus (MONTEIRO, 2018).

4.4.1.5 Processos existentes

Os processos de pirólise também podem ser classificados em baixa, média e alta temperatura, sendo que alguns autores definem essas faixas de temperatura de maneiras

diferentes. Segundo Buekens (2006), as reações de baixa temperatura ocorrem a 400 °C ou menos, entre 400 °C e 600 °C ocorre a pirólise de média temperatura, enquanto acima de 600 °C ocorre a pirólise de alta temperatura. Ainda, em relação às condições de processo, o autor afirma que a pirólise geralmente ocorre à pressão atmosférica. Operações abaixo desta pressão devem ser empregadas caso os produtos desejados sejam termicamente instáveis ou facilmente repolimerizáveis, como ocorre no processamento de borrachas ou estirenos (BUEKENS, 2006).

Recentemente, muitos processos de pirólise foram desenvolvidos com a finalidade de superar as limitações discutidas em estudos passados. Entre eles, pode-se destacar, baseado no estudo de Monteiro (2018):

- **Processo BASF:** são três estágios no processo de pirólise de resíduos plásticos da empresa alemã BASF. No primeiro, ocorre uma liquefação a 300 °C em vaso agitado; seguida de craqueamento em um forno tubular a gás a 350 – 480 °C; e, no último estágio, ocorre a separação de produtos em uma coluna de destilação (gases, 20 a 30% e óleos, 60 a 70%). Os produtos obtidos desse processo são hidrocarbonetos gasosos e hidrocarbonetos líquidos, como compostos aromáticos, nafta e óleos com elevado ponto de ebulição.
- **Processo da *British Petroleum (BP Chemicals)*:** O processo da BP caracteriza-se pela pirólise de resíduos plásticos com menos de 2% de PVC em um leito de areia fluidizado, com temperatura em torno de 500 °C. O produto formado, composto de hidrocarbonetos para plantas petroquímicas, passa por uma etapa de purificação, onde o HCl e partículas finas são removidos.
- **Processo NKT:** A empresa dinamarquesa NKT utiliza um processo de pirólise a baixa temperatura (375 °C) para resíduos de PVC ou resíduos plásticos em geral. Depois das etapas de separação e pré-tratamento, os plásticos são encaminhados para uma câmara de combustão e, em seguida, passam por uma etapa de extração de metal. Além dos metais - aproximadamente 60% de chumbo -, são obtidos coque, cloreto de cálcio e condensado orgânico, que pode ser utilizado como combustível.
- **Processo *Akzo Nobel*:** A *Akzo Nobel* utiliza um reator com dois leitos circulantes fluidizados. No primeiro leito acontece uma pirólise rápida a 700 - 900 °C, onde os resíduos são transformados em gás combustível, *char* residual e HCl. Já no segundo,

ocorre uma combustão. O processo utiliza RSU plástico com elevado teor de PVC e são obtidos também CH₄, CO, HCl e H₂.

- **Processo Hitachi:** A empresa possui um processo de pirólise de mistura de resíduos plásticos em tanque agitado, onde são obtidas frações de gasolina e querosene. A reação ocorre a baixa temperatura e remove automaticamente o carvão e outras partículas residuais.
- **Processo Chiyoda:** esta empresa japonesa desenvolveu uma tecnologia que liquefaz resíduos plásticos. Antes da etapa de pirólise, os polímeros residuais passam por uma eliminação de cloro, na qual PVC e PET são convertidos em HCl e ácido tereftálico. Após isso, o material fundido é transferido para um reator aquecido e, então, é convertido a hidrocarbonetos gasosos e resíduos. A fase gasosa é destilada e separada em óleo pesado, óleo médio, óleo leve e gás. A porção leve do óleo pode ser usada como matéria-prima para plantas petroquímicas ou como óleo combustível.

4.4.1.6 Vantagens e desvantagens da pirólise térmica

Assim como as demais tecnologias, a pirólise térmica apresenta vantagens e desvantagens. Como pontos positivos, pode-se destacar que este processo possibilita a reciclagem de misturas plásticas, de plásticos sujos e contaminados, além de permitir o processamento de plásticos laminados, resultantes de embalagens multicamadas, que são difíceis de reciclar de modo convencional. No entanto, alguns problemas também são encontrados na degradação térmica, como o depósito de coque e de carbono em superfícies de equipamento, principalmente trocadores de calor; a baixa qualidade dos combustíveis obtidos como produtos; e os elevados níveis de enxofre no produto final (MONTEIRO, 2018).

4.4.2 Pirólise Catalítica

A técnica de craqueamento catalítico está sendo visada pela possibilidade de gerar produtos de maior valor agregado a partir de plástico pós-consumo. Nesse contexto, o catalisador converte o resíduo em uma fração de petróleo mais valorizada, como por exemplo a gasolina (MONTEIRO, 2018).

O mecanismo que ocorre neste tipo de reciclagem é o craqueamento carbocatiônico, dado que a formação de carbocátions é beneficiada pela presença de ramificações e duplas

ligações. É necessária, também, a escolha correta do catalisador, visto que pode ocorrer reações simultâneas ao craqueamento, como oligomerização, ciclização e aromatização, (AGUADO *et al.*, 2006).

Neste processo pode haver a degradação dos resíduos plásticos diretamente com o uso de catalisadores, ou seja, sem nenhum tratamento térmico precedente, ou estes podem passar por algum craqueamento térmico prévio. No primeiro caso, embora apresente maior eficiência energética, há limitações do uso cíclico dos catalisadores, exigindo que estes ofereçam resistência significativa a meios altamente heterogêneos, como é no caso de resíduos plásticos e seus aditivos. No segundo caso, o tratamento térmico anterior atua como um pré-craqueamento da matéria, com eliminação de produtos indesejados - como, por exemplo, o cloro do PVC -, sendo, portanto, a melhor opção para processos aplicados a misturas de resíduos plásticos multicomponentes (MONTEIRO, 2018).

Em relação aos produtos obtidos, quando comparado à pirólise térmica, pode-se concluir que (BUTTLER *et al.*, 2011; MONTEIRO, 2018):

- os produtos da pirólise térmica apresentam maiores faixas de massas molares e, portanto, são mais pesados, o que exige pós-tratamento;
- a pirólise catalítica apresenta maior produção de C3 e C4, de frações parafínicas, olefínicas e de aromáticos do que a pirólise térmica;
- a pirólise térmica apresenta maior geração de C1 e C2, naftênicos e parafinas, já a pirólise catalítica fornece predominantemente produtos voláteis e com pontos de ebulição mais baixos - a distribuição de produtos pode ser controlada pela seleção do catalisador;
- a pirólise catalítica, usualmente, leva a maiores seletividades na faixa da gasolina;
- a pirólise catalítica produz menores quantidades de resíduos do que a pirólise térmica, no entanto esta última apresenta baixa produção de coque.
- as frações gasosas derivadas das degradações térmicas e catalíticas não exibem diferenças significativas.

4.4.2.1 Influência da carga polimérica no produto

A composição da carga polimérica influencia diretamente o desempenho dos catalisadores. Por essa razão, observa-se que os catalisadores que promovem boas conversões

no craqueamento de polímeros puros diminuem significativamente sua atividade quando submetidos a reações de craqueamento de misturas de resíduos plásticos. Conseqüentemente, a distribuição de produtos de uma mistura de plásticos é significativamente diferente, quando comparada à degradação catalítica de componentes individuais, pelas interações dos mecanismos de degradação (BUEKENS e HUANG, 1998). Cabe destacar que a composição destes resíduos pode variar bastante, dependendo da origem, dificultando a previsibilidade do desempenho do catalisador (MONTEIRO, 2018).

Conforme citado anteriormente, o craqueamento catalítico sem contato direto entre catalisador e o polímero ocorre por meio da realização de uma degradação térmica prévia do material residual. Esta solução se presta sobretudo aos resíduos que contenham componentes que dificultam o desempenho do catalisador. Ademais, o craqueamento catalítico direto restringe o contato das moléculas poliméricas nos microporos de catalisadores ácidos, como zeólitas (MONTEIRO, 2018).

4.4.2.2 **Influência da temperatura de reação**

A degradação catalítica ocorre normalmente em temperaturas menores do que a degradação térmica, resultando em um menor consumo total de energia. Os resíduos plásticos iniciam a degradação em 300 °C e, em temperaturas elevadas (maiores que 600 °C), há o favorecimento da formação de moléculas pequenas e gasosas. Em temperaturas baixas (menores que 400 °C), formam-se mais produtos líquidos e há um aumento da tendência à formação de coque, de produtos secundários e de ocorrência de reações de desidrogenação (MONTEIRO, 2018).

Além disso, em geral, com o aumento deste parâmetro, ocorre também um aumento paralelo da atividade dos catalisadores. Entretanto, deve ser ponderado que, em temperaturas mais altas, ocorre simultaneamente craqueamento térmico, causando modificações na seletividade do produto. Portanto, pode-se concluir da literatura que a temperatura influencia de diferentes maneiras a reação de degradação e a qualidade do produto final obtido (MONTEIRO, 2018).

4.4.2.3 Agitação

Uma das principais dificuldades técnicas da pirólise de plásticos é deposição de coque no reator, ocasionando baixas taxas de transferência de calor. A utilização de catalisadores em reações de degradação pode agravar este problema, uma vez que o depósito de coque na superfície do catalisador acarreta sua desativação, prejudicando a eficiência da reação (MONTEIRO, 2018).

Por isso, é necessário o desenvolvimento de reatores com agitação eficiente, que permitam a remoção contínua de coque para uma operação contínua. Um reator tubular com um agitador tipo hélice foi elaborado na Polônia com o intuito de misturar o plástico fundido e retirar o coque depositado na parede interna. Já o processo *Thermofuel* da empresa *Cynar Plc* usa um reator com um raspador interno que é estendido até as paredes do recipiente, para a eliminação contínua de coque (SCHEIRS *et al.*, 2006).

4.4.2.4 Catalisadores

O principal objetivo do uso dos catalisadores na pirólise de plásticos é a conversão dos produtos da fase vapor do reator em correntes líquidas de elevada octanagem, para a formação de gasolina. A seletividade, estabilidade e atividade dos catalisadores são as características mais importantes e que devem ser consideradas no processo de escolha do material (BUEKENS, 2006).

De acordo com a literatura, catalisadores heterogêneos são os mais empregados neste tipo de reciclagem. São tipicamente materiais sólidos, com a reação ocorrendo nos sítios ativos de sua superfície. São empregados em condições severas de temperatura e pressão e são facilmente segregados dos reagentes e produtos líquidos e gasosos. Além disso, estes catalisadores são porosos e a porosidade é um parâmetro crítico. Diante deste cenário, grande variedade de catalisadores heterogêneos tem sido avaliada no craqueamento catalítico de poliestireno e poliolefinas, como catalisadores zeolíticos - (H)US-Y (*H-ultrastabilized Y zeolite*), (H)ZSM-5, (H)MOR (*H-mordenita*) -, catalisadores argilosos (Sponita, ATOS e AZA) e catalisadores não zeolíticos mesoporosos (sílica gel, alumina-silicato), além dos catalisadores de FCC (craqueamento catalítico em leito fluido). Dentre os catalisadores apresentados, as zeólitas têm sido as mais estudadas no craqueamento de poliolefinas (MONTEIRO, 2018).

Em relação à quantidade de catalisador utilizada, Scheirs (2006) avaliou que a quantidade de catalisador a ser acrescentada ao resíduo plástico para craqueamento catalítico deve ser de 5 a 10% em massa, mostrando, com isso, que o conteúdo relativo de catalisador no processo deve ser alto (MONTEIRO, 2018).

4.4.2.5 Processos e tecnologias existentes

A maioria dos processos patenteados que utilizam a pirólise catalítica de resíduos plásticos é direcionada para a produção de combustíveis (diesel, gasolina e querosene). Nesse contexto, alguns processos catalíticos foram desenvolvidos, como o Processo *Thermofuel* da *Cynar Plc*, *Nanofuel* da *Alphakat*, Processo *Smuda*, Processo *T-technology*, Processo *Reentech*, *Agylis* e *STEPS* (BUTTLER *et al.*, 2011).

Entretanto, Monteiro (2018) questiona se, caso seja de interesse que esses produtos voltem a ser aproveitados como insumo para o ciclo do plástico, o enfoque da produção não devesse ser diferente. A autora expõe que não existe opinião formada na literatura se o emprego do catalisador no processo compensa os gastos e alguns problemas inerentes ao seu uso. A consolidação do processo de FCC, um dos mais relevantes processos de conversão da indústria petrolífera, aumenta as dúvidas entre os pesquisadores sobre o fato de muitos processos de craqueamento não utilizarem catalisador. As indagações também se estendem à reciclagem dos resíduos plásticos.

4.4.2.6 Vantagens e desvantagens da pirólise catalítica

As vantagens da utilização de catalisador na quebra de resíduos plásticos são, principalmente: a menor temperatura de reação, diminuindo, com isso, o gasto energético; as reações são mais rápidas, permitindo menores tempos de residência; apresenta elevada seletividade para produtos na faixa da gasolina (C5 – C10) e elevada produção de C3 e C4, de frações olefínicas, parafínicas e aromáticos; além da menor produção de resíduos, como citado anteriormente (MONTEIRO, 2018).

Uma das maiores desvantagens deste processo está na especificação bastante imprevisível da carga e dos produtos (BUEKENS, 2006). Ademais, a presença de heteroátomos mostra-se problemática, principalmente em relação aos halogênios, que causam

problemas de qualidade do produto e problemas operacionais com a contaminação dos catalisadores.

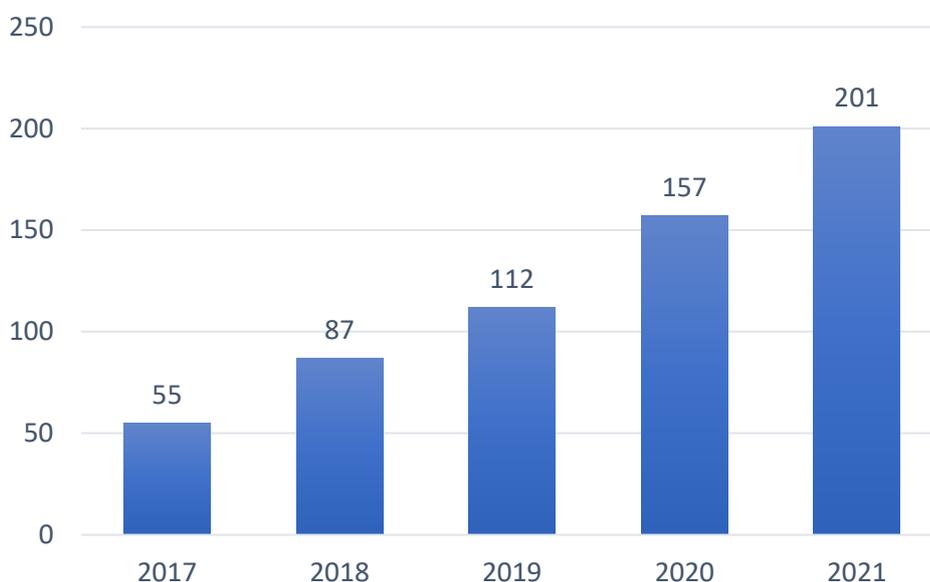
5. ETAPA PROSPECTIVA

5.1 LONGO PRAZO – ARTIGOS CIENTÍFICOS

5.1.1 Análise Macro

A Análise Macro abrange o estudo da série histórica dos artigos publicados, dos países de origem e do tipo de instituição a que os autores estão vinculados. O primeiro gráfico obtido refere-se à evolução temporal dos 612 artigos encontrados pela busca na base Scopus.

Figura 8: Evolução temporal dos artigos publicados de 2017 a set/2021



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Scopus (2021)

A Figura 8 mostra que houve um aumento na produção de artigos no período analisado. Ponderando sobre as mudanças de paradigmas para a circularidade e a sustentabilidade nos últimos anos, o crescimento do interesse pelo tema é justificado. Há, atualmente, a visão de que os resíduos têm valor agregado e, com isso, podem ser reutilizados ou reciclados, o que reflete na busca por melhorias tecnológicas a fim de se alcançar uma viabilidade técnico-econômica do setor.

Ademais, com a crise mundial de saúde causada pela COVID-19, o consumo e o descarte de materiais plásticos aumentaram consideravelmente, agravando um quadro já

crítico de disposição inadequada de resíduos sólidos. Portanto, a busca por alternativas de reciclagem desse tipo de material torna-se necessária e urgente.

A segunda análise obtida resultou no gráfico de distribuição dos artigos por país. A Figura 9 mostra o número de publicações de artigos dos dezenove países que mais publicaram sobre o assunto durante o período analisado.

Figura 9: Distribuição dos artigos por país de 2017 a set/2021



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Scopus (2021)

De acordo com o gráfico, a China destaca-se como a maior produtora de artigos científicos a respeito do assunto, com um total de 140 artigos, seguida da Índia (112), Estados Unidos (74) e Reino Unido (59).

Desde a década de 1980, as indústrias chinesas importam resíduos sólidos de países estrangeiros - especialmente plástico, papel e resíduos de metal. De acordo com dados das Nações Unidas, mais de 70% dos resíduos de plástico no mundo foram exportados para a China em 2015 (LEE *et al.*, 2020). O principal objetivo dessas importações era compensar a escassez de recursos internos em vista de uma economia em rápida expansão (CONSELHO DE ESTADO DA REPÚBLICA POPULAR DA CHINA, 2017).

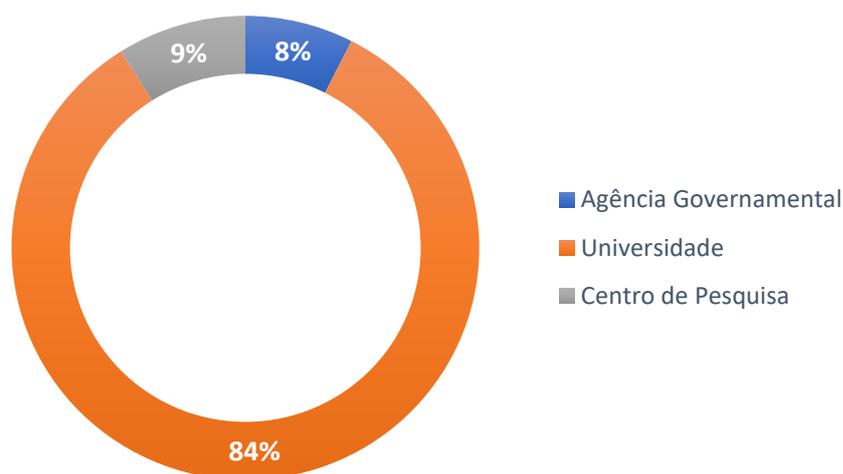
No entanto, com as quantidades crescentes de importações de resíduos juntamente com o aumento da produção de resíduos domésticos, sobrecarregaram-se as capacidades de

reciclagem e descarte da China. Nesse cenário, além de reduzir o volume de resíduos importados, a China também promulgou políticas para reduzir a geração de resíduos no país (LEE *et al.*, 2020). Porém, apesar de terem evoluído com a incineração de resíduos no país, os chineses estão em busca da transição de uma economia de carbono linear para circular por meio da reciclagem química. Portanto, medidas adicionais estão sendo implementadas para complementar o foco atual em redução, separação e incineração de resíduos, o que explica o destaque de publicações do país no setor.

Os demais países que aparecem com contribuições significativas também estão buscando, de médio a longo prazo, a transição para uma economia circular do carbono, o que sugere investimentos em pesquisa e desenvolvimento das tecnologias de reciclagem química, como a pirólise, para o caso dos resíduos plásticos. Os demais países que apareceram com quantidades relevantes de artigos foram: Coreia do Sul, Espanha, Itália, Hungria, Egito, Malásia, Arábia Saudita, Japão, Austrália, Canadá, Indonésia, Nigéria, Alemanha, França e Hong Kong; todos com onze ou mais publicações.

Como terceira análise macro, obteve-se a Figura 10 com a distribuição de artigos por tipo de instituição.

Figura 10: Distribuição dos artigos por tipo de instituição de 2017 a set/2021



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Scopus (2021)

A maior parte dos autores de artigos está vinculada a uma universidade. Sendo assim, 84% das contribuições científicas relacionadas a pirólise de resíduos plásticos têm a

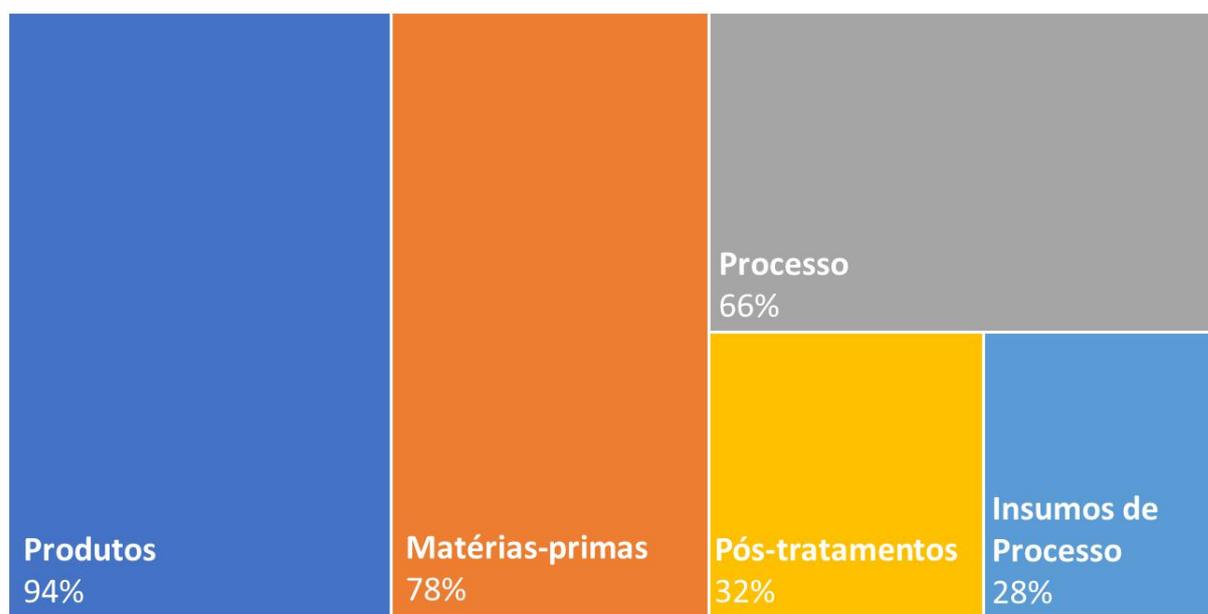
participação deste tipo de instituição. Os centros de pesquisas participaram de 9% das publicações e a única agência governamental presente nas estatísticas foi o Ministério da Educação da China (8%), que, em números absolutos, contribuíram com o maior número de artigos sobre o assunto, totalizando 21. A Universidade de Leeds do Reino Unido e a Universidade da Panônia da Hungria também se destacaram em quantidades absolutas, cada uma possui 18 autorias e/ou coautorias em artigos sobre o tema. A maior presença de universidade europeias corrobora com o fato de que essa tecnologia tem mais destaque em regiões mais desenvolvidas economicamente.

5.1.2 Análise Meso

Nesta análise, os documentos foram classificados de acordo com os aspectos mais relevantes em torno da produção de combustíveis a partir da pirólise de resíduos plásticos, que dizem respeito às seguintes taxonomias: Matérias-primas, Processo, Produtos, Insumos do Processo e Pós-Tratamento.

A Figura 11 mostra o resultado da análise Meso. É válido destacar que um mesmo artigo pode ser categorizado em mais de uma taxonomia.

Figura 11: Análise Meso dos artigos científicos



Fonte: Elaboração própria

Nota-se que a taxonomia “Produtos” é a mais recorrente nas pesquisas científicas, seguida pela de “Matérias-primas”. A taxonomia “Processo” também se mostra expressiva, principalmente em relação a busca pelas melhores condições e parâmetros de processos já existentes.

Dos 50 artigos estudados, 47 foram classificados na Meso “Produtos” e 39, na Meso “Matérias-primas”. Uma possível explicação para esse resultado é o interesse dos autores em analisar as composições dos óleos de pirólise a partir da matéria-prima advindas dos resíduos sólidos urbanos, testando-se diferentes composições de alimentação do processo e almejando produtos de maior qualidade e de maior valor agregado para a comercialização. A taxonomia “Insumos de processos” - como equipamentos, energia e suprimentos -, foi a menos explorada pelos pesquisadores, com apenas 14 documentos categorizados.

5.1.3 Análise Micro

Na análise Micro há um maior detalhamento das taxonomias da análise Meso. A Tabela 8 sumariza os resultados encontrados nesta etapa do estudo.

Tabela 8: Análise Micro dos artigos científicos

Meso	Número Meso	Micro	Número Micro
Matérias-primas	39	Resíduos de plásticos puros	20
		Mistura de resíduos plásticos	27
		Caracterização	13
Processo	33	Parâmetros e condições de processo	21
		Pirólise térmica	10
		Pirólise catalítica	15
Produtos	47	Óleo de pirólise	23
		Gás de pirólise	11
		<i>Char</i>	3
		Diesel de pirólise	15
		Gasolina de pirólise	8
		Querosene de pirólise	3
		Outros produtos reciclados	6
		Caracterização	32
		Aplicação	17
Insumos do processo	14	Reator	5
		Catalisador	9
		Energia fornecida ao sistema de pirólise	1
		Equipamentos acessórios	1
Pós-tratamentos	16	Destilação	9
		Misturas	7
		Outros pós-tratamentos	2

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado, dos 39 artigos categorizados na Meso “Matérias-primas”, a maioria se concentrou em abordar misturas de resíduos plásticos. Nesse sentido, alguns trabalhos utilizaram amostras recolhidas de aterros sanitários e outros, misturas de resíduos que refletiam a composição gravimétrica de cidades ou países. Outros estudos, porém, focaram apenas em um tipo de plástico, dedicando-se à análise da influência do polímero puro na composição do produto. De modo geral, os polímeros mais recorrentes nos documentos foram: polietileno de alta densidade, polietileno de baixa densidade, polipropileno e poliestireno (resíduos plásticos mais comuns).

Dos artigos que tiveram como foco o “Processo”, a maioria abordou parâmetros e condições de processos, como a cinética, a influência da temperatura e atmosfera do meio

reacional. Um exemplo é o artigo publicado pelo *National Institute of Technology* da Índia, que investigou o efeito da temperatura de operação nos rendimentos líquidos do produto no processo de pirólise por aquecimento não isotérmico (SINGH *et al.*, 2019). Ainda, é válido mencionar que a pirólise catalítica teve maior destaque nos artigos em relação à pirólise térmica.

Quanto à taxonomia “Produtos”, a maior parte dos artigos focou na fração líquida (óleo de pirólise), sendo que 26 comparavam o produto a combustíveis comerciais, sendo categorizados separadamente como diesel, gasolina ou querosene de pirólise. A maior preocupação dos autores sobre o tema foi a caracterização dos produtos deste processo. Pode-se destacar, como exemplo disso, o artigo da Dow Chemical que contribuiu com a primeira quantificação do tipo PIONA (parafinas, isoparafinas, olefinas, naftênicos e aromáticos) de óleos de pirólise por cromatografia gasosa acoplada à detecção ultravioleta a vácuo (CG-VUV) (DUNKLE, 2021). Tendo em vista que a saída da carga da pirólise tem uma composição diferente do tradicional fluxo de hidrocarbonetos baseados em fósseis, é necessário, de fato, uma consolidação dos conhecimentos sobre os produtos gerados, passando, necessariamente, pela caracterização destas substâncias.

Ainda, a maioria dos artigos categorizados na Micro “Aplicação” apresentaram testes de motores para os combustíveis obtidos. Entre os “Outros produtos reciclados”, lubrificantes, nafta, químicos básicos (benzeno, tolueno e xilenos), hidrogênio e nanotubos de carbono foram apresentados como alternativas aos produtos combustíveis mais abordados (diesel e gasolina).

Em relação à fração gasosa, o GLP apareceu como o principal produto nas discussões sobre aplicações, e o *char*, por sua vez, foi pouco valorizado quanto suas possibilidades de destinação, sendo destacado em apenas três documentos.

Quanto aos “Insumos do processo”, nove pesquisas focaram em avaliações dos catalisadores - síntese, caracterização e desempenho. Cinco estudos tinham como objetivo a avaliação de reatores, sendo um deles do tipo extrusora, dois do tipo leito fluidizado e três fornos rotativos (um mesmo artigo analisou a pirólise em dois estágios, sendo o primeiro em extrusora seguido por um reator de leito fluidizado). Apenas um documento avaliou a energia fornecida ao sistema de pirólise, propondo a utilização da fase gasosa para o auto aquecimento da planta. A Micro “Equipamentos acessórios” só foi destaque em um artigo, onde propuseram a otimização do dimensionamento do condensador após o reator para maximizar a fração do produto de interesse.

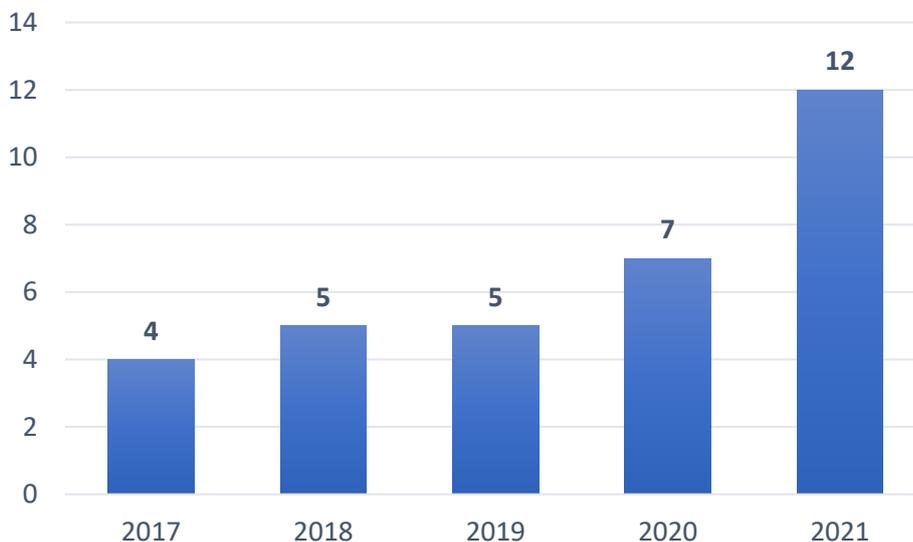
A Meso “Pós-Tratamento” demonstrou que a destilação é a tecnologia de *downstream* mais empregada nas pesquisas, embora os *blends* com combustíveis comerciais de base fóssil também se mostrou relevante dentro da análise desta categoria. No entanto, pelos artigos avaliados, pode-se notar que a maior parte não propôs uma tecnologia de pós-tratamento. “Outros pós-tratamentos” refere-se à hidrogenação dos óleos de pirólise para produção de combustíveis.

5.2 MÉDIO PRAZO – PATENTES DEPOSITADAS

5.2.1 Análise Macro

A primeira análise levou em consideração o ano de publicação das patentes. A Figura 12 apresenta a série histórica das patentes solicitadas, com seu ano de publicação entre 2017 e novembro de 2021.

Figura 12: Evolução temporal das patentes depositadas de 2017 a nov/2021



Fonte: Elaboração própria

É possível observar um crescimento das solicitações de patentes sobre pirólise de resíduos plásticos ao longo dos anos, demonstrando-se que há um movimento em direção à circularidade que está acelerando a busca por tecnologias nessa área.

A segunda análise resultou no gráfico de distribuição dos artigos por país. A Figura 13 mostra a contribuição dos nove países que mais depositaram patentes sobre o assunto durante o período analisado.

Figura 13: Distribuição das patentes depositadas por país de 2017 a nov/2021

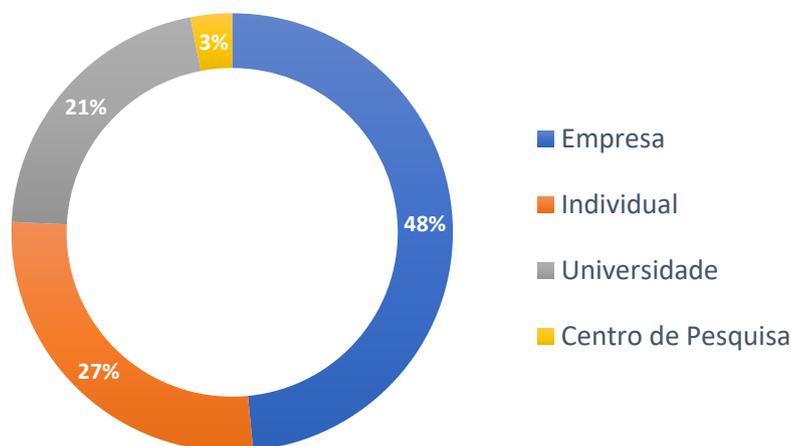


Fonte: Elaboração própria

De acordo com a Figura 13, pode-se destacar que os Estados Unidos (10) e a Índia (10) lideram em número de depósitos de patentes. A China (4) também se mostra relevante nas análises, corroborando com o cenário discutido na “Macro” de longo prazo, onde Estados Unidos, Índia e China foram apontados como os países que mais estão buscando tecnologias de pirólise nos últimos anos. Também é possível notar a participação dos países Austrália (3), Indonésia (2), Finlândia (1), França (1), Taiwan (1) e Canadá (1) nesta análise.

A Figura 14 apresenta a distribuição dos tipos de instituição (empresa, universidade, centro de pesquisa ou individual) que solicitaram pedidos de patentes nos últimos cinco anos.

Figura 14: Distribuição de patentes depositadas por tipo de instituição de 2017 a nov/2021



Fonte: Elaboração própria

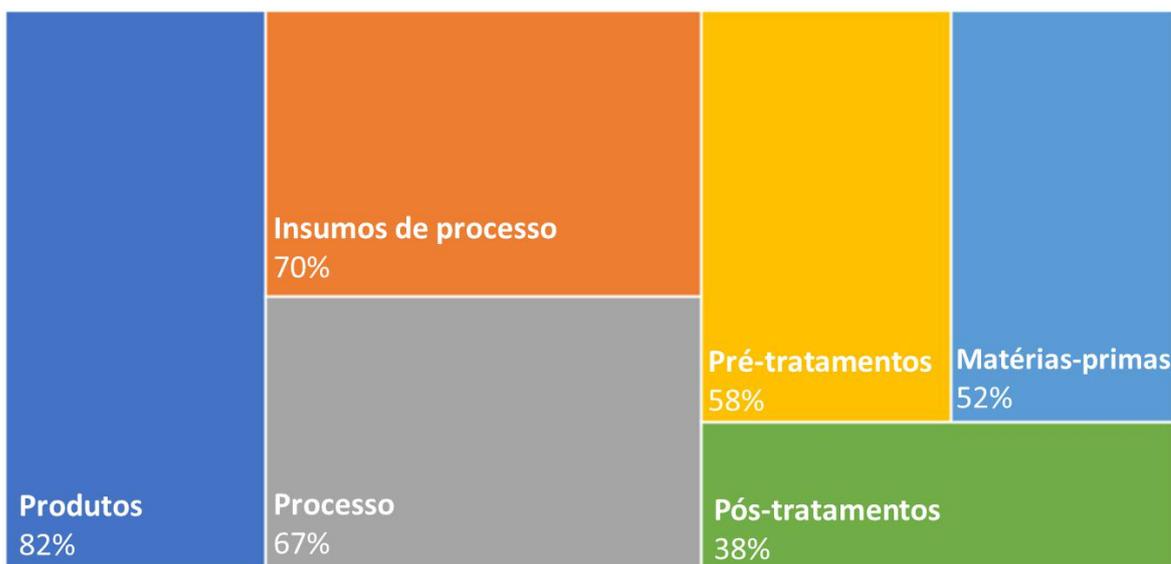
Como mostrado, a maioria dos pedidos de patentes foi realizada por empresas (48%). Este resultado é esperado, tendo em vista que empresas possuem maior interesse na obtenção de patentes pelo privilégio de sua exploração e o consequente ganho de monopólio no mercado da tecnologia. Desse total, quatro patentes foram solicitadas pela empresa *Exxonmobil Chemical*, duas pela *Chevron USA* e duas pela *Eastman Chemical Company*. Estas três corporações são consideradas grandes *players* dos setores de óleo e gás (O&G), petroquímico e químico, e mostram-se interessadas pela pirólise de plásticos à medida que a indústria busca trazer opções sustentáveis para o mercado. Nesse contexto, quase todos os principais atores do setor têm algum tipo de envolvimento, e a maioria está ativamente construindo ou financiando instalações comerciais de pirólise (WILLARD, 2021). Outras pequenas empresas da área de energia e soluções verdes também estão se movimentando nesse mercado, podendo ser citada a *Future Energy Investments* da Austrália.

Uma parceria entre centros de pesquisa chineses foi verificada com uma única contribuição e universidades chinesas e indianas solicitaram juntas sete concessões patentes. Os demais documentos foram depositados por pessoas físicas (27%).

5.2.2 Análise Meso

Os pedidos de patente foram classificados de acordo com os aspectos mais relevantes em torno da pirólise de resíduos plásticos. Esses aspectos foram organizados de forma similar a dos artigos, com o acréscimo, porém, da categoria “Pré-Tratamento”. Isso porque, na análise de longo prazo, as etapas de pré-tratamento não foram foco dos artigos selecionados ou não eram sequer mencionadas. No entanto, as pesquisas elaboradas nas patentes demonstraram maiores preocupações em relação ao assunto, sendo discutido em 19 patentes. A Figura 15 apresenta a distribuição das taxonomias no total de pedidos de patentes estudados.

Figura 15: Análise Meso das patentes depositadas



Fonte: Elaboração própria

Diferentemente do que ocorreu nos artigos, a taxonomia “Insumo de Processos” ganhou destaque junto com “Produtos”. É um comportamento esperado, uma vez que os insumos são fundamentais para a implementação de tecnologias em escala industrial. Dos 33 documentos analisados, 27 detalhavam os produtos, 23 continham discussões sobre os insumos de processos e 22 preocuparam-se com o desenvolvimento do processo. A taxonomia “Pós-tratamento” foi a menos mencionada, aparecendo em 13 documentos.

5.2.3 Análise Micro

Nesse subitem, cada taxonomia Meso é detalhada e suas particularidades são identificadas. A análise Micro gerada para os pedidos de patentes está explicitada na Tabela 9

Tabela 9: Análise Micro das patentes depositadas

Meso	Número Meso	Micro	Número Micro
Pré-Tratamento	19	Separação	8
		Lavagem/limpeza	5
		Trituração	8
		Pré-aquecimento/fusão	8
Matérias-primas	17	Resíduos de plásticos puros	7
		Mistura de resíduos plásticos	13
		Caracterização	0
Processo	22	Parâmetros e condições de processo	16
		Pirólise térmica	3
		Pirólise catalítica	7
Produtos	27	Óleo de pirólise	14
		Gás de pirólise	6
		<i>Char</i>	4
		Diesel de pirólise	12
		Gasolina de pirólise	5
		Querosene de pirólise	2
		Outros produtos reciclados	5
		Caracterização	3
		Aplicação	5
Insumos do processo	23	Reator	10
		Catalisador	5
		Energia fornecida ao sistema de pirólise	7
		Equipamentos acessórios	10
Pós- tratamentos	13	Destilação	5
		Misturas	2
		Outros pós-tratamentos	7

Fonte: Elaboração própria

Como mostrado, das 19 patentes que abordaram o “Pré-Tratamento”, a maioria destacou a importância de etapas de separação, triagem e trituração do resíduo pós-consumo.

Etapas de pré-aquecimento a montante do reator também foram bastante abordadas, principalmente utilizando-se extrusoras para fusão e homogeneização do material sólido. A patente “*Fluidized Bed Plastic Waste Pyrolysis With Melt Extruder*” (WO 2021/216284) da empresa americana *Exxonmobil Chemical* pode ser destacada quanto à utilização deste equipamento na alimentação de um reator de leito fluidizado. Os autores defendem que, por se tratar de resíduos, cuja principal característica é a sua variabilidade e heterogeneidade, os pré-tratamentos devem ser considerados para se evitar contaminação do catalisador, produção de compostos indesejados, modificações na distribuição do produto e problemas operacionais, por exemplo.

Quanto à taxonomia “Matérias-primas”, a maior parte dos autores preocupou-se com a pesquisa de misturas de resíduos plásticos para simular a realidade dos resíduos sólidos urbanos. Os estudos que focaram somente no resíduo plástico puro se dedicaram, principalmente, às poliolefinas PEAD, PEBD e PP. Alguns, inclusive, foram enfáticos em relação à presença de PVC e PET, que geram subprodutos clorados e heteroátomos indesejados no processo.

Dentre as patentes que focaram na Meso “Processos”, a maioria se dedicou ao desenvolvimento de um processo já em escala industrial, sendo consolidados os parâmetros, condições e rotas. Muitas, inclusive, especificaram fluxogramas e diagramas de bloco da produção de combustíveis e “Outros produtos reciclados” pela pirólise. A pirólise catalítica, novamente, teve destaque em relação à térmica.

A fração líquida, assim como nos artigos, foi de maior interesse pelos pesquisadores e empresas na Meso “Produtos”, sendo o diesel e frações pesadas de pirólise como os principais representantes dessa taxonomia. Nas patentes, porém, foi bastante abordada a conversão dos plásticos residuais em monômeros, principalmente para a produção de poliolefinas. Este interesse está sendo movimentado pelos *players* de O&G, analisados na etapa Macro, que desejam implementar a circularidade nos seus processos. A exemplo disso, as patentes da Chevron incluíram o processamento de resíduos plásticos por pirólise em unidades de refinaria, como as de FCC e de alquilação (US11172436A1 - “*Circular Economy for Plastic Waste to Polypropylene via Refinery FCC Unit*”).

A taxonomia “Insumos de processo” ganhou relevância nas patentes, diferentemente do que se observa a nível de pesquisa acadêmica, tendo em vista que este é um fator fundamental para o estabelecimento de uma tecnologia a nível comercial. Muitas empresas se dedicaram ao estudo de aparatos que melhor se adequassem à realidade do processo, como

reatores, roscas transportadoras e extrusoras, além de equipamentos e melhores procedimentos de alimentação do sistema de pirólise e remoção do *char*. Ademais, com o destaque da pirólise catalítica, patentes de catalisadores também foram encontradas, embora em menor quantidade quando comparado as outras taxonomias Micro.

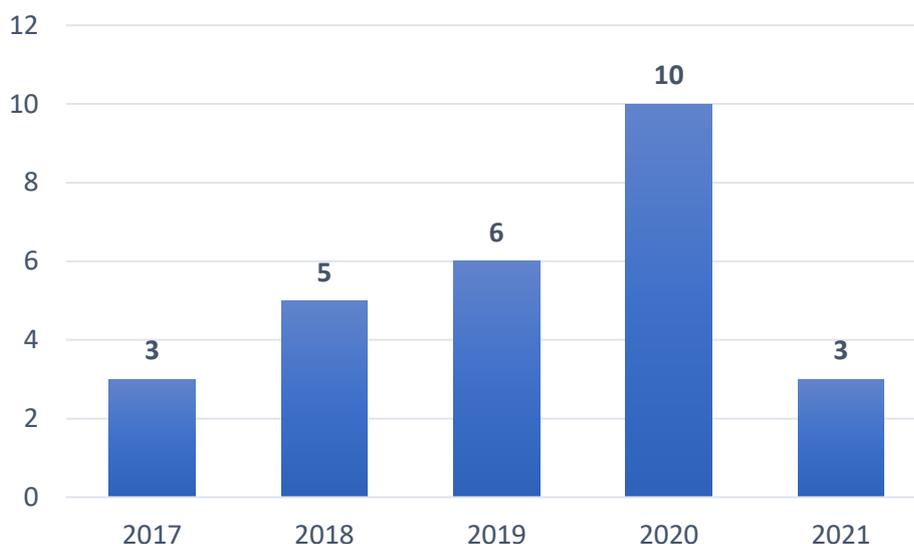
Outros pós-tratamentos, além da destilação e misturas, tiveram maior relevância, podendo ser citadas etapas de filtração, extração líquido-líquido e unidades de FCC.

5.3 CURTO PRAZO – PATENTES CONCEDIDAS

5.3.1 Análise Macro

A Figura 16 refere-se à série histórica das patentes concedidas, com seu ano de publicação entre 2017 e novembro de 2021.

Figura 16: Evolução temporal das patentes concedidas de 2017 a nov/2021



Fonte: Elaboração própria

Nota-se, novamente, um crescimento na concessão de patentes sobre o tema ao longo dos anos, com destaque para o ano de 2020. O decréscimo no ano de 2021, atingindo o mesmo patamar de 2017, pode ser explicado pelo tempo de verificação do documento pelos escritórios de patentes, já que o número de depósitos durante o ano foi o mais significativo na avaliação anterior.

A segunda análise (Figura 17) apresenta o estudo da distribuição das patentes concedidas por país de origem do pedido.

Figura 17: Distribuição das patentes concedidas por país de 2017 a nov/2021



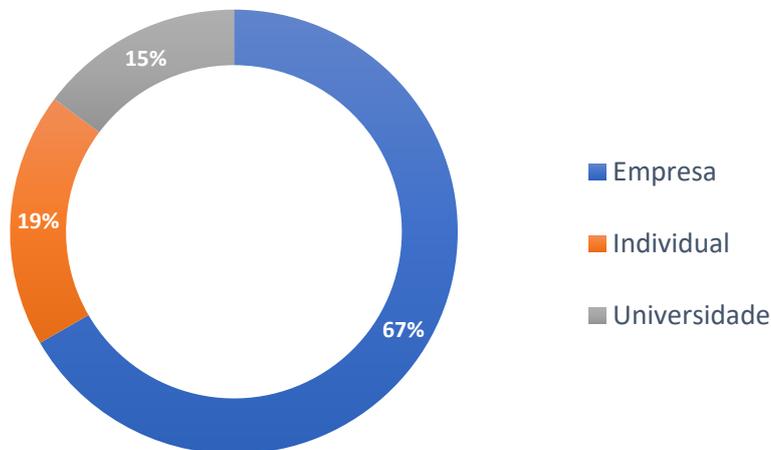
Fonte: Elaboração própria

De acordo com o gráfico, pode-se destacar que os Estados Unidos, Holanda e Coreia do Sul são os maiores detentores de patentes sobre a produção de combustíveis a partir da pirólise de resíduos plásticos.

China, Índia, Indonésia, Reino Unido e Taiwan aparecem com um total de duas patentes concedidas cada, e os demais países (Arábia Saudita, Bélgica, França, Irlanda, Itália e Luxemburgo), apenas uma. Nota-se, pela primeira vez, uma maior participação de países da União Europeia nessa análise. Isso sugere que esta tecnologia está em estágios de implementação mais avançados na Europa que nas demais regiões do mundo.

O gráfico da Figura 18 apresenta a distribuição dos tipos de instituição (universidade, empresa ou individual) que tiveram pedido de patente concedido durante os últimos cinco anos. Centros de pesquisa não foram identificados.

Figura 18: Distribuição de patentes concedidas por tipo de instituição de 2017 a nov/2021



Fonte: Elaboração própria

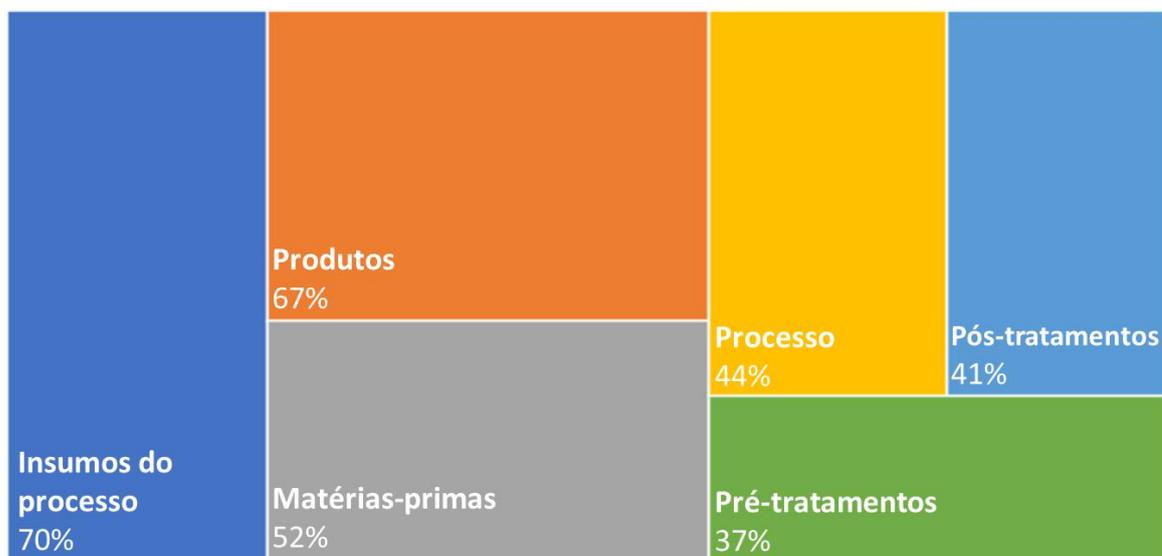
Assim como ocorreu na análise das solicitações de patentes, a Figura 18 demonstra que a maior parte das patentes concedidas pertence a empresas. A que detém o maior número de patentes é a SABIC, com um total de quatro patentes. E, novamente, a Chevron USA se destaca, com duas concessões.

Médias e pequenas empresas do setor de reciclagem e soluções sustentáveis também tiveram patentes concedidas durante o período avaliado, podendo ser citadas a *Agilyx*, *Recycling Technologies* e a *Plastic Energy*. As únicas representantes de universidades são asiáticas, sendo duas indianas (*University of Petroleum and Energy Studies* e *National Institute of Technology Calicut*), uma chinesa (*Guangdong Provincial Academy of Environmental Science*) e uma da Indonésia (*Universitas Sumatera Utara*), que representam 15% dos documentos selecionados.

5.3.2 Análise Meso

As patentes concedidas foram categorizadas de acordo com as taxonomias apresentadas na Meso de médio prazo. A apresentação do resultado da distribuição das taxonomias no total de patentes concedidas estudados encontra-se na Figura 19.

Figura 19: Análise Meso das patentes concedidas



Fonte: Elaboração própria

Quando comparado com o cenário das patentes depositadas, algumas taxonomias inverteram de posição. No entanto, a tendência de importância das taxonomias é a mesma para as duas categorias de patentes. “Insumos de processo” e “Produtos” seguem liderando as discussões, seguidos por “Matérias-primas” e “Processo”. E as taxonomias de “Pós-tratamento” e “Pré-tratamento” recebem menor atenção, representando menos de 50% das tecnologias concedidas cada uma. Com isso, há uma indicação de oportunidades de pesquisa e desenvolvimento nessas duas áreas.

5.3.3 Análise Micro

O detalhamento das taxonomias Meso é realizado nesta etapa. A análise Micro gerada para as patentes concedidas é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10: Análise Micro das patentes concedidas

Meso	Número Meso	Micro	Número Micro
Pré-Tratamento	10	Separação	3
		Lavagem/limpeza	3
		Trituração	3
		Pré-aquecimento/fusão	6
Matérias-primas	14	Resíduos de plásticos puros	3
		Mistura de resíduos plásticos	14
		Caracterização	4
Processo	12	Parâmetros e condições de processo	11
		Pirólise térmica	1
		Pirólise catalítica	4
Produtos	18	Óleo de pirólise	12
		Gás de pirólise	7
		Char	4
		Diesel de pirólise	7
		Gasolina de pirólise	4
		Querosene de pirólise	2
		Outros produtos reciclados	7
		Caracterização	3
Insumos do processo	19	Reator	7
		Catalisador	3
		Energia fornecida ao sistema de pirólise	4
		Equipamentos acessórios	9
Pós-tratamentos	11	Destilação	3
		Misturas	0
		Outros pós-tratamentos	8

Fonte: Elaboração própria

Como mostrado, das 10 patentes que abordaram o “Pré-Tratamento”, a maioria se concentrou no pré-aquecimento e/ou fusão antes da etapa de reação.

Quanto à taxonomia “Matérias-primas”, a mesma discussão sobre misturas e resíduos puros pode se estender às patentes concedidas. Sobre a presença de PVC na alimentação do sistema, a patente “*Catalytic process of simultaneous pyrolysis of mixed plastics and dechlorination of the pyrolysis oil*” (US10717936B2) da SABIC expõe bem a necessidade de eliminação de clorados para a utilização do óleo de pirólise como alimentação de *crackers* nas

refinarias. Com isso, os autores se dedicaram a solucionar este problema com o estudo realizado.

Em relação à taxonomia “Processo”, a maior parte dos estudos também se propôs a desenvolver processos de pirólise, determinando os melhores parâmetros e condições.

A taxonomia “Produtos” teve uma maior participação das discussões das frações gasosas em relação às análises anteriores, com destaque para a utilização do gás como substituto ao GLP e a recirculação do mesmo para aquecimento do sistema de pirólise. E os “Outros produtos reciclados” identificados foram monômeros - como para as patentes depositadas -, nafta e químicos aromáticos, como benzeno e xileno.

A categoria “Insumos do Processo” foi a que mais teve destaque, principalmente devido ao desenvolvimento de tecnologias de reatores. E em relação aos pós-tratamentos, *blends* com combustíveis comerciais não foram mencionados em nenhum dos documentos. Os “Outros pós-tratamentos” abordados foram hidrocraqueamento, reforma catalítica, alquilação e FCC em refinarias.

5.4 ESTÁGIO ATUAL

5.4.1 Análise Macro

Na análise macro, levou-se em consideração apenas a distribuição de empresas por país. As análises relativas ao ano não foram realizadas, dado que a pesquisa já levou em conta os atores no cenário atual. Ainda, análises relativas ao tipo de instituição também não necessitaram ser feitas, pois somente empresas foram selecionadas. A Figura 20 refere-se ao resultado encontrado nesta análise.

Figura 20: Países de origem dos *players* atuantes no estágio atual



Fonte: Elaboração própria

Destaca-se que os Estados Unidos possuem a maior concentração de atores no setor, como a empresa *Dow*, *Honeywell*, *Alterra Energy*, *Nexus Fuels* e *Plastic2Oil*. A Noruega tem duas representantes: a *Quantafuel* e a *Agilyx*. A representante brasileira Braskem foi selecionada pelas parcerias que está realizando na área. No entanto, é válido mencionar que os projetos estão sendo direcionados à América do Norte, segundo declarações da própria empresa, deixando o Brasil sem planejamento concreto de plantas comerciais de reciclagem química avançada de plásticos.

5.4.2 Análise Meso

A Figura 21 apresenta a distribuição das taxonomias de acordo com os *players* avaliados.

Figura 21: Análise Meso do estágio atual



Fonte: Elaboração própria

A análise Meso revelou que as taxonomias mais relevantes são “Processo” e “Produtos”. Todas as empresas definem seus processos tecnológicos como térmicos ou catalíticos e a maioria expõe um diversificado portfólio de produtos.

Os “Insumos do Processo” foram identificados com o foco atual de empresas menores, como: *Alterra Energy*, *Plastic Energy*, *Quantafuel* e *Plastic2Oil*. Um comportamento esperado, tendo em vista que estas são empresas dedicadas exclusivamente ao setor de reciclagem. A empresa *Quantafuel* é única que se mostrou dedicada ao desenvolvimento de catalisadores e foi a maior representante em relação a Meso “Pós-tratamento”.

5.4.3 Análise Micro

A categorização mais detalhada da etapa Meso está descrita na Tabela 11.

Tabela 11: Análise Micro do estágio atual

Meso	Número Meso	Micro	Número Micro
Pré-Tratamento	4	Separação	3
		Lavagem/limpeza	1
		Trituração	0
		Pré-aquecimento/fusão	1
Matérias-primas	5	Resíduos de plásticos puros	0
		Mistura de resíduos plásticos	5
		Caracterização	0
Processo	13	Parâmetros e condições de processo	3
		Pirólise térmica	9
		Pirólise catalítica	5
Produtos	9	Óleo de pirólise	8
		Gás de pirólise	1
		<i>Char</i>	1
		Diesel de pirólise	4
		Gasolina de pirólise	2
		Querosene de pirólise	2
		Outros produtos reciclados	8
		Caracterização	0
Insumos do processo	4	Reator	1
		Catalisador	1
		Energia fornecida ao sistema de pirólise	3
		Equipamentos acessórios	1
Pós- tratamentos	3	Destilação	2
		Misturas	0
		Outros pós-tratamentos	2

Fonte: Elaboração própria

Dentro da taxonomia “Pré-Tratamento”, a separação foi a categoria de maior representatividade. A *Plastic Energy* destaca que as etapas de separação e limpeza dos resíduos plásticos servem para a remoção de metais e materiais pesados, além da seleção de polímeros que são capazes de serem processados.

Em relação à taxonomia “Matérias-primas”, as empresas trabalham com misturas de resíduos plásticos e, em sua maioria, só conseguem processar PEAD, PEBD, PS e PP.

Já em relação ao “Processo”, o resultado mais significativo foi a utilização da pirólise térmica para a conversão dos resíduos. Nessa mesma Meso, a taxonomia “Parâmetros e

condições de processo” foi significativa, principalmente, para a empresa *Alterra Energy*, que destaca a utilização de sua tecnologia baseada em termodinâmica e cinética química, para alcançar um processo eficiente e contínuo.

Quanto aos “Produtos”, as grandes empresas de refino estão dedicadas à utilização do óleo de pirólise como matéria-prima para a produção de monômeros, promovendo, de fato, uma circularidade em seus processos. Por isso o grande destaque das taxonomias “Óleo de pirólise” e “Outros produtos reciclados”. As menores empresas e *start-ups* do setor destacam o grande *range* de combustíveis que podem oferecer, como gasolina, querosene, diesel, óleos pesados e ceras. As frações gasosa e sólida são pouco valorizadas como produtos, como se pode notar com o resultado da análise.

Dentro da taxonomia “Insumos de processos”, o destaque foi para as discussões de autossuficiência energética da planta, com o uso dos gases não condensáveis como combustível para o aquecimento do reator.

Na Meso “Pós-Tratamento”, “Destilação” foi identificada em dois *players* diferentes, *Plastic Energy* e *Quantafuel*. É válido destacar os “Outros pós-tratamentos” encontrados também na *Quantafuel*, que desenvolveu um processo catalítico de dois estágios para a purificação da fase gasosa que sai do reator pirolítico, além da BASF, que está desenvolvendo etapas de purificação do óleo de pirólise antes de ser introduzido nos *crackers*.

6. ETAPA PÓS-PROSPECTIVA

Para a construção do *Roadmap* Tecnológico, foram utilizadas as informações obtidas na fase prospectiva dos artigos, patentes e nas mídias das empresas. O objetivo desta etapa é a organização das informações da etapa anterior, mostrando-as em um diagrama composto pelo eixo de tempo (horizontal) e das taxonomias (vertical).

Ao longo do eixo horizontal, o *Roadmap* foi dividido segundo o Estágio Atual, Curto Prazo, Médio Prazo e Longo Prazo. Ademais, cada *player* foi correlacionado à sua taxonomia Meso e Micro através de marcações circulares ao longo de uma reta vertical que corta as logomarcas das empresas.

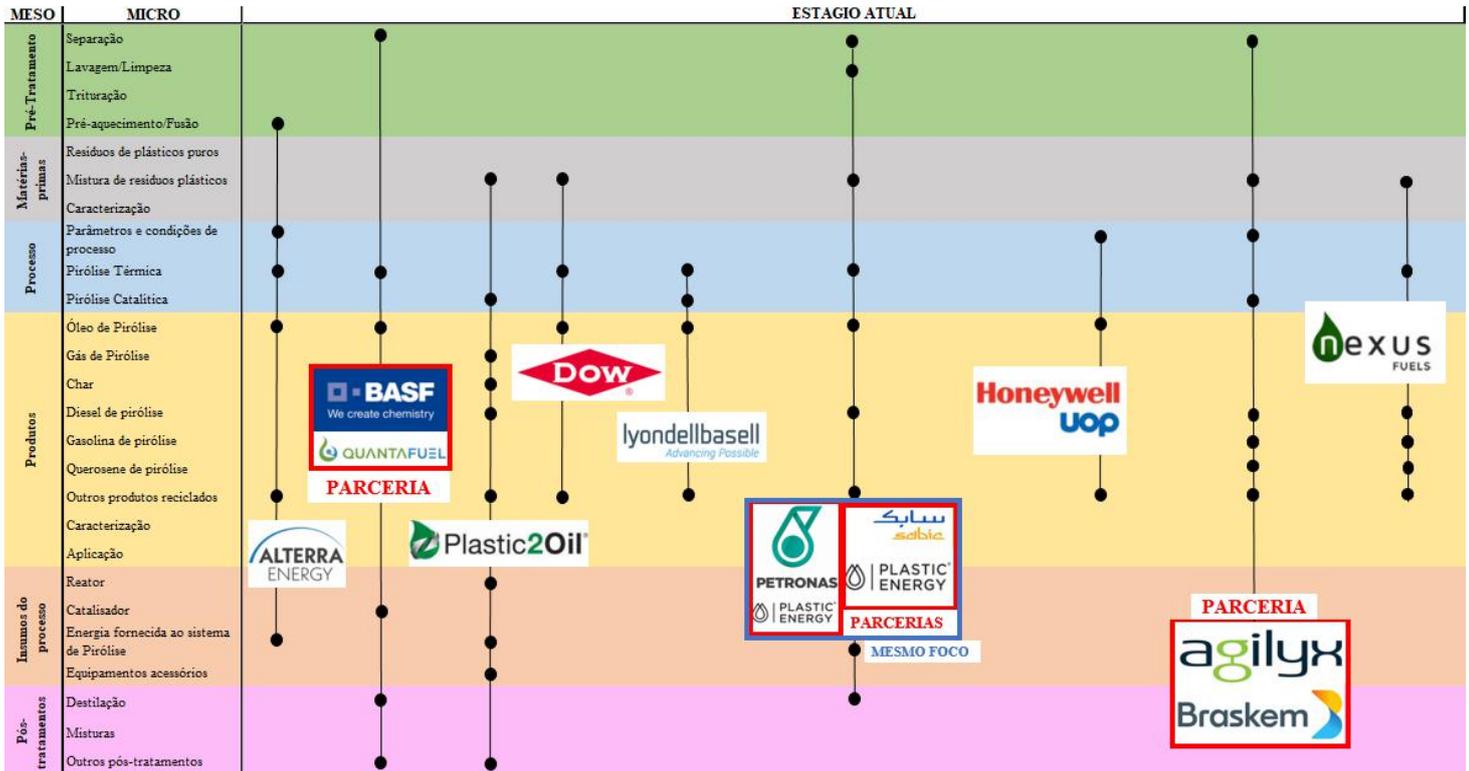
Para melhor organização do mapa e das análises, foi denominado como *cluster* “Parceria” os *players* que trabalharam juntos. Além disso, os atores que abordavam as mesmas taxonomias foram agrupados em um *cluster* indicado como de “Mesmo Foco”.

O *Roadmap*, apresentado no ANEXO 4 – *ROADMAP* TECNOLÓGICO, é muito extenso, sendo assim, ele será mostrado nas próximas seções em cortes verticais em função do tempo.

6.1 ESTÁGIO ATUAL

A Figura 22 mostra o recorte do estágio atual do *Roadmap* Tecnológico da pirólise de resíduos plásticos. Os *players* apresentados foram mapeados por terem atuações no setor de acordo com a mídia especializada.

Figura 22: Estágio atual do Roadmap Tecnológico



Fonte: Elaboração própria

As taxonomias mostraram-se bem distribuídas pelo *Roadmap* e os *drivers* “Processo” e “Produtos” foram os mais mencionados. As Micros “Outros produtos reciclados” e “Óleo de pirólise” foram citadas um maior número de vezes que as demais dentro da Meso “Produtos”, demonstrando que os *players* atuais não estão focados somente na utilização do óleo de pirólise como combustível, mas também como matéria-prima para a indústria petroquímica e química, implementando uma circularidade real na cadeia produtiva. E, em relação à taxonomia “Processos”, a tecnologia de pirólise térmica mostrou-se como a predominante nas empresas que atuam no setor. Em contrapartida, “Pré-tratamentos” e “Pós-tratamentos” não são muito mencionados pelas empresas, indicando gargalos tecnológicos, o que possibilita oportunidades de pesquisa e desenvolvimento nestas etapas produtivas.

A empresa americana *Alterra Energy* se especializou no desenvolvimento de uma tecnologia própria de pirólise. Nesse contexto, a empresa se propõe a fornecer matéria-prima de alta qualidade para produção de polímeros e de produtos químicos a partir do óleo de pirólise, além de licenciar a tecnologia para clientes. Comissionada em 2020, a unidade de reciclagem avançada de 60 t/dia da *Alterra*, em Ohio, é a única planta contínua em escala

comercial do seu tipo. Ainda, a planta existente produz volumes comerciais de óleos que já podem ser refinados.

Principalmente na Europa, a BASF se movimenta em relação à economia circular do setor de plásticos, com a criação do projeto *ChemCycling*TM. Nesse projeto, estão trabalhando com parceiros para desenvolver ainda mais a tecnologia de pirólise. No entanto, a empresa não tem como objetivo possuir uma planta. No modelo de negócio adotado, o óleo de pirólise usado para fabricar os produtos circulares pilotos foram e serão adquiridos de um reciclador, como a *Quantafuel*, com a qual formaram parceria.

A *Quantafuel* iniciou a primeira planta de pirólise e purificação com uma capacidade nominal de aproximadamente 16.000 t/ano na Dinamarca e, atualmente, possui mais uma unidade no país e projetos pilotos e comerciais na Suíça, Reino Unido e Noruega. A empresa destaca que as grandes vantagens de sua tecnologia são o “Pré-tratamento” - que permite eliminação de impurezas e uma mistura de diferentes cores e tipos de plásticos para processamento -, além da purificação do gás formado pela pirólise como etapa de “Pós-tratamento”. O diferencial tecnológico da *Quantafuel* é o processo catalítico de duas etapas na fase gasosa, que permite que maximizem a valorização dos resíduos plásticos utilizando catalisadores projetados para aumentar a qualidade dos hidrocarbonetos desejados.

Em relação ao *player Plastic2Oil*, o módulo de processamento dessa empresa americana aceita resíduos de plástico não lavados e não classificados. Segundo a empresa, as melhores matérias-primas são polietileno e polipropileno. A taxa de conversão de resíduos de plástico em combustível é de 86%, devido ao uso de um catalisador exclusivo da *Plastic2Oil*. Aproximadamente um galão de combustível é extraído de 3,8 quilogramas de plástico. O processador usa seus próprios gases residuais como combustível (de 10 a 12% da produção do processo). Aproximadamente 2-4% do produto resultante é *char* com alto poder calorífico.

A empresa destaca, ainda, que o processador P2O é projetado para usar quantidades mínimas de energia externa. Além de ser benéfico para o meio ambiente, este é também um fator significativo na viabilidade comercial do processo. A água é usada apenas para resfriamento e somente 53 kWh de eletricidade são necessários para operar ventiladores, bombas e pequenos motores. Nenhuma eletricidade é usada na transformação do plástico em combustível e gás natural só é usado para o *start-up* da planta. Em relação aos “Produtos”, o combustível fica pronto para venda após a conclusão do processamento, sem a necessidade de refino adicional. A partir de um único módulo de processamento, a empresa é capaz produzir

uma variedade de produtos combustíveis, incluindo diesel, destilado de petróleo, nafta e negro de carbono.

Outro grande ator, também representante dos EUA, é a Dow. O mercado está colocando um valor significativo na circularidade e a multinacional está inovando para atender à enorme demanda não atendida por polímeros circulares e de baixo carbono. Os avanços na área incluem: parcerias e acordos para dimensionar a produção de plásticos circulares por meio da reciclagem avançada; para purificar o óleo de pirólise para a produção de matérias-primas para o *cracker*; e a própria empresa está acelerando o projeto, a engenharia e a construção de uma unidade de purificação em escala de desenvolvimento de mercado, na Holanda, para fornecer capacidade adicional para purificar a matéria-prima do óleo de pirólise derivado de resíduos plásticos.

Com o mesmo objetivo que a Dow e a BASF, a holandesa *LyondellBasell* tem uma planta piloto na Itália, usando sua tecnologia própria MoReTec, envolvendo catálise, para converter misturas de resíduos plásticos em óleo de pirólise que será alimentado em *crackers* de nafta. No entanto, os volumes são pequenos neste momento. Em 2021, a *LyondellBasell* começou a oferecer PE e PP quimicamente reciclados sob sua marca *CirculenRevive* usando óleo de pirólise de terceiros.

O *cluster* de mesmo foco formado pelas parcerias entre *Petronas* e *Plastic Energy*, e a SABIC também com a *Plastic energy*, pretendem obter nafta bruta para a produção de polímeros. A SABIC está avançando com uma instalação semicomercial que aumentará a produção de óleo de pirólise a partir de resíduos plásticos. A produção fornecerá inicialmente materiais para os colaboradores de *downstream* da empresa, mas a intenção de longo prazo é aumentar rapidamente o fornecimento de seus polímeros circulares certificados para todos os clientes globais.

A *Plastic Energy*, por sua vez, é uma empresa dedicada à reciclagem química, com duas plantas em operação na Espanha. Recebe como matérias-primas misturas de plásticos, materiais contaminados, multicamadas, bem como plásticos que não podem mais ser reciclados mecanicamente (polietileno de alta e baixa densidade, polipropileno e poliestireno). A carga inicial é submetida a um pré-tratamento para remover alguns componentes, como metais, materiais pesados e umidade, além de ser realizada a seleção dos polímeros que podem ser processados. Como produtos da destilação atmosférica, fornece nafta e diesel além de gases residuais no topo da coluna. A fração gasosa é usada para a manutenção energética

da planta, enquanto os dois outros produtos são comercializados para a indústria petroquímica.

Em 2021, a multinacional americana *Honeywell* declarou a entrada no mercado de reciclagem química com o lançamento de sua tecnologia de processo *UpCycle*, que utiliza a pirólise e o gerenciamento de contaminantes para converter resíduos plásticos em matéria-prima para polímero reciclado. A tecnologia *UpCycle* expande os tipos de plásticos que podem ser reciclados para incluir resíduos de plástico que não seriam de outra forma, incluindo embalagens coloridas, flexíveis, multicamadas e poliestireno.

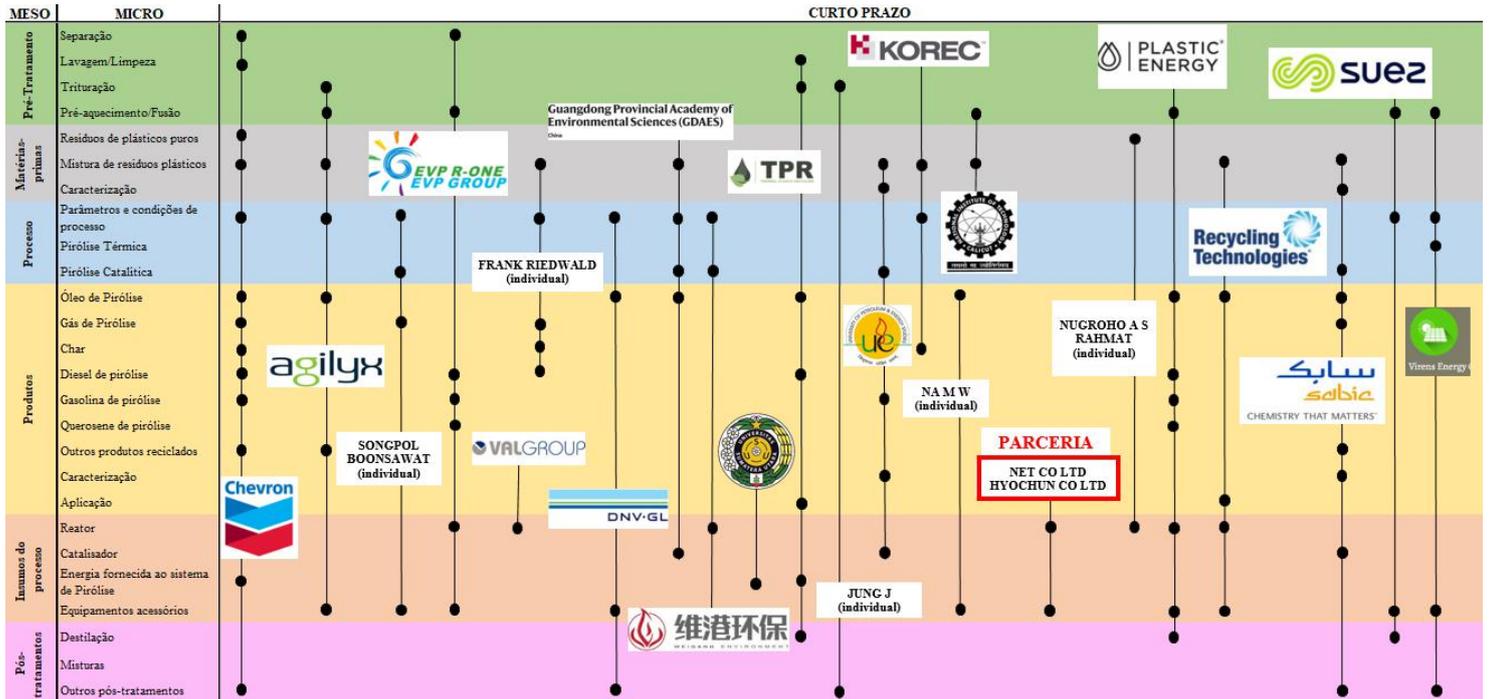
Já a parceria *Agilyx/Braskem* visa avaliar um caminho eficiente para a produção de polipropileno (PP) usando misturas de resíduos plásticos de difícil reciclagem, movidos pela tecnologia de reciclagem avançada da *Agilyx*. Os resíduos plásticos para este projeto seriam obtidos por meio da empresa de gerenciamento de resíduos da *Agilyx, Cyclyx International Inc.* Nesse cenário, a *Agilyx* licencia sua tecnologia de pirólise para os clientes, fornecendo suporte na fase de design e implementação das plantas. Em 2018, sua tecnologia proprietária possibilitou operação da primeira planta comercial de conversão *plastic-to-plastic* de poliestireno. Segundo a empresa, o portfólio de produtos inclui plásticos reciclados (PS, PMMA, PET, PE e PP), intermediários de plástico (nafta, olefinas), além de combustíveis de baixo carbono (diesel, combustível de aviação, gasolina, óleo *bunker* e VGO (*Vacuum Gas Oil*)).

O último *player* destacado nessa etapa é a *Nexus Fuels*, uma empresa americana de gestão de resíduos e produção de energia que desenvolveu um processo de pirólise em escala comercial (50 t/dia) para converter resíduos plásticos em matérias-primas para a produção de plásticos e combustíveis, que podem ser posteriormente refinados em uma gama de produtos, como gasolina, querosene, diesel, óleos pesados e ceras. A *Nexus* tem a capacidade de processar plásticos limpos numerados: 2 (HDPE), 4 (LDPE), 5 (PP) e 6 (PS).

6.2 CURTO PRAZO

A Figura 23 mostra o recorte de curto prazo do *Roadmap* Tecnológico. Os *players* apresentados são os detentores das tecnologias de patentes sobre pirólise de resíduos plásticos.

Figura 23: Curto prazo do Roadmap Tecnológico



Fonte: Elaboração própria

O Roadmap de curto prazo apresenta todos os *players* que tiveram patentes concedidas nos últimos cinco anos, sendo as empresas o tipo de instituição mais presente no recorte. As taxonomias mais abordadas são “Insumos de processos” e “Produtos”, respectivamente. Dentro de “Insumos de processos”, os documentos dividem-se entre as taxonomias “Reator” e “Equipamentos acessórios”, majoritariamente. Na Meso “Produtos”, o óleo de pirólise foi o foco da maioria dos documentos, seguido pelo combustível diesel.

A empresa com o maior número de patentes concedidas nos últimos anos foi a multinacional saudita SABIC, com quatro documentos. Os focos dos documentos são “Produtos” e “Matérias-primas”, com destaque para “Mistura de resíduos plásticos”, “Caracterização” (das matérias-primas) e “Outros produtos reciclados”, sendo esses últimos aromáticos básicos (benzeno e xileno) e olefinas.

Outra empresa multinacional que também se destacou como detentora de patentes, foi a Chevron, com dois documentos. As duas patentes tiveram como objetivo o estabelecimento de uma rota circular para a produção de PE e PP pela pirólise de resíduos pós-consumo de PE e/ou PP através da operação de uma refinaria. É, portanto, fornecido um processo contínuo para a conversão desses tipos de resíduos plásticos. O processo compreende a seleção da carga inicial, que segue para um reator de pirólise. O efluente pirolisado é separado em gás

residual, uma fração de nafta/diesel, uma fração de pesados e carvão. O óleo e a cera de pirólise, que compreende a fração nafta/diesel e a fração pesada, são encaminhados para uma das unidades da refinaria. Nesse cenário, a taxonomia “Produtos” foi a de maior enfoque dos documentos.

Em relação a pequenas empresas do setor de reciclagem avançada, tem-se a britânica *Recycling Technologies*, que divulgou um processo que inclui a alimentação de “Misturas de resíduos plásticos” em um reator de pirólise para a produção de combustível. Dessa forma, o “Óleo de pirólise” combustível é aplicado para a produção de eletricidade por meio de um gerador. A taiwanesa *EVP Technology* teve como foco o desenvolvimento de uma planta modular de pirólise. O mecanismo categoriza o plástico residual e o processa para obter querosene, diesel e gasolina.

Também foram estudados documentos de empresas que já apareceram como *players* no estágio atual. A *Agilyx* apresentou uma patente descrevendo um sistema e método para reciclar resíduos plásticos, incluindo um sistema para recuperar monômero de estireno de resíduos de poliestireno, distribuindo-se bem entre as taxonomias “Pré-tratamento”, “Processo”, “Produtos” e “Insumos de processo”. E a *Plastic Energy* voltou-se mais aos “Produtos” em sua patente ao definir um processo para tratar resíduos de material plástico para fornecer pelo menos um produto combustível de acordo com as especificações.

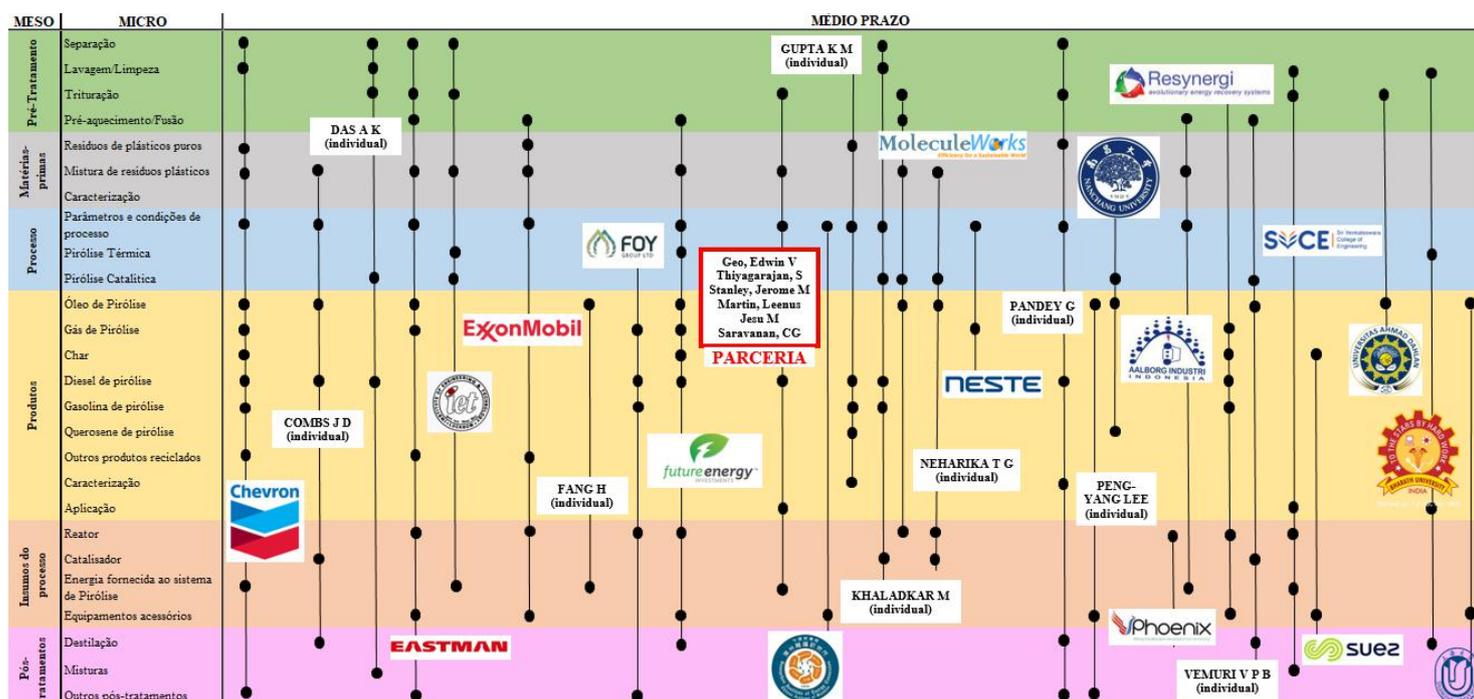
Foi identificada uma patente de empresa brasileira, a *Valgroup*, que atua como produtora e recicladora de embalagens plásticas rígidas e flexíveis. No documento, o *player* desenvolveu um reator de refluxo contínuo e sistema de condensador controlado para tratamento termoquímico de resíduos plásticos. Nesse sentido, sua única atuação identificada foi categorizada como “Insumos de processo”.

As representantes chinesas e indianas entre as Universidades têm como foco principal o estudo da “Pirólise catalítica”, com o desenvolvimento de “Catalisador” como “Insumo de processo”.

6.3 MÉDIO PRAZO

A Figura 24 apresenta o recorte de médio prazo do *Roadmap* Tecnológico. Os atores mostrados depositaram pedidos de patentes sobre pirólise de resíduos plásticos nos últimos cinco anos.

Figura 24: Médio prazo do *Roadmap* Tecnológico



Fonte: Elaboração própria

Como observado no mapeamento, diversas empresas depositaram patentes nos últimos anos sobre o tema estudado, além de ser notável uma maior participação de universidades nesse recorte temporal. As taxonomias mais recorrentes no *Roadmap* de médio prazo também foram “Produtos” e “Insumos de processo”, com ênfase para os *drivers* “Óleo de pirólise”, “Diesel de pirólise” e “Reator”.

A empresa que mais depositou nos últimos cinco anos, segundo os critérios deste estudo, foi a multinacional *Exxonmobil Chemical*, com três patentes. A companhia dedicou-se aos “Insumos de processos” e ao “Pré-tratamento”, com foco no processo e equipamentos de alimentação (rosca e extrusora) de material plástico em um reator de pirólise. Uma das patentes também abordou sobre a tecnologia de “Reator” de leito fluidizado com a alimentação de uma rosca.

A empresa americana *Chevron* novamente aparece como destaque, com duas patentes depositadas juntamente com a multinacional *Eastman Chemical* e a *Future Energy Investments*. Os documentos da *Chevron* são similares às patentes concedidas, cujo objetivo é a inclusão da pirólise na cadeia petroquímica, promovendo a reciclagem em unidades de refinarias. A *Eastman* apresentou um processo e sistema para liquefazer plástico residual como “Pré-tratamento”, seguindo com a carga para um reator de filme (*film reactor*). Ainda,

desenvolveu outro método e sistema de pirólise para “Matéria-prima” residual plástica variável e resíduos líquidos pós-industriais.

A *Future Energy Investments* é uma empresa especializada no processamento sustentável de resíduos plásticos. O foco dos seus documentos é o desenvolvimento de plantas e processos para a conversão de resíduos plásticos em combustível por pirólise.

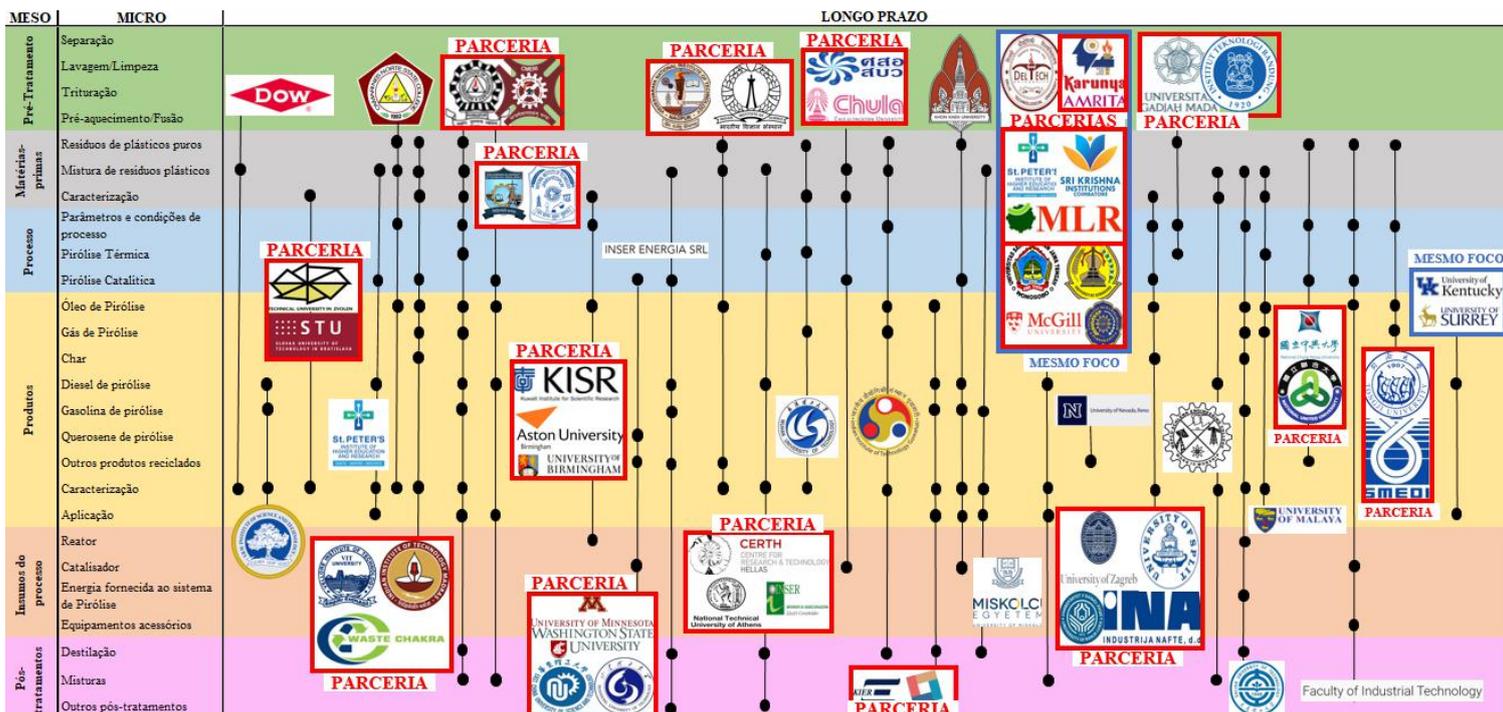
Em relação a outras grandes empresas multinacionais, a petrolífera finlandesa Neste propôs uma metodologia para processamento do gás de pirólise que sai do reator. Já o grupo SUEZ, atualmente representado pela ENGIE, desenvolveu uma unidade de remoção de partículas de “Char” em um processo pirolítico, composta, principalmente, por roscas transportadoras externamente resfriadas.

As universidades focaram mais na taxonomia “Produtos”, tendo como principais *drivers* o “Óleo de pirólise” e sua “Aplicação” principalmente em testes de motores de combustão interna.

6.4 LONGO PRAZO

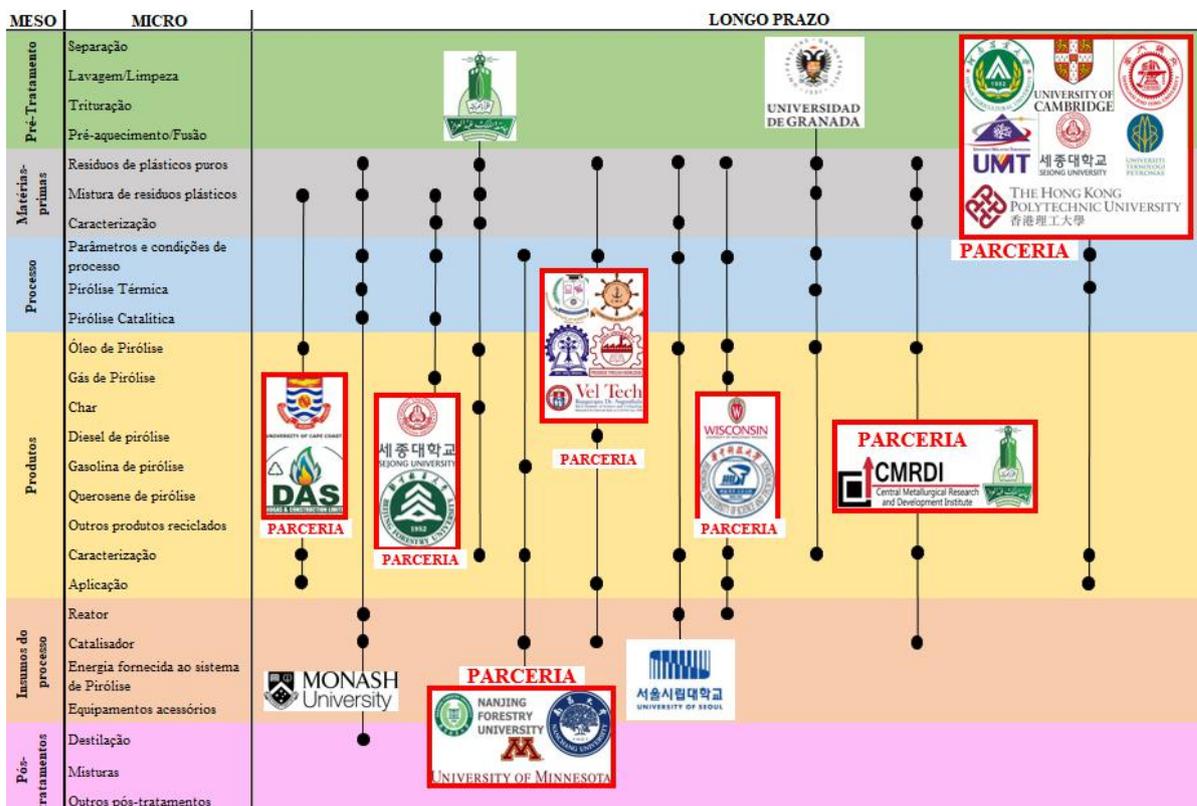
As Figura 25 e Figura 26 apresentam o recorte temporal de longo prazo do *Roadmap* Tecnológico. Esta etapa foi elaborada a partir dos artigos científicos selecionados no capítulo de prospecção.

Figura 25: Longo prazo do Roadmap Tecnológico



Fonte: Elaboração própria

Figura 26: Longo prazo do Roadmap Tecnológico – continuação



Fonte: Elaboração própria

Como já discutido, o tipo de instituição que mais publicou no recorte de longo prazo foram as universidades, sendo a maioria dos artigos elaborados por parcerias acadêmicas. Centros de pesquisa e pequenas e médias empresas regionais também contribuíram nos estudos de pirólise. A Dow foi a única grande multinacional que apareceu no Longo Prazo. Diante disso, a taxonomia mais presente nesses documentos foi a de “Produtos”, com maior foco em “Caracterização”, “Óleo de pirólise” e “Diesel de pirólise”.

O óleo de pirólise não é um produto padronizado. Nesse sentido, os métodos de teste padrão são quase inexistentes. No entanto, com esse resultado do *Roadmap*, é possível notar que esforços estão sendo feitos para formalizar estes métodos, apesar dos desafios da heterogeneidade da matéria-prima.

Ademais, vale mencionar que as etapas de “Pré-tratamento” foram suprimidas da análise por não serem o foco de nenhum dos documentos selecionados.

A parceria entre os pesquisadores do *National Institute of Technology* (Durgapur, Índia) e do *Central Mechanical Engineering Research Institute* (CSIR, Índia) foi a que mais contribuiu, com a publicação de três artigos, sendo dois voltados para as Mesos “Matéria-prima” e “Processos” - com a caracterização de diferentes resíduos e a avaliação do efeito da temperatura do reator na análise de rendimento e seu mecanismo de degradação detalhado - e um analisando mais os “Produtos” e “Pós-tratamento”, com a aplicação do produto pirolítico em motores de combustão interna. Assim, as taxonomias ficaram bem distribuídas para esse *player*, uma vez que para a produção de combustível por pirólise são necessárias todas essas etapas mostradas no mapa.

A *University of Minnesota* também contribuiu com três publicações, sendo produtos de parcerias diferentes. Em duas parcerias, também com a participação da *Washington State University* e a *East China University of Science and Technology*, o objetivo principal do estudo era a avaliação da produção de combustível de aviação e hidrogênio a partir da pirólise catalítica. Já em outra parceria, a universidade voltou-se à pirólise catalítica assistida por micro-ondas para a produção de hidrocarbonetos na faixa da gasolina. Portanto, pode-se dizer que estes *players* têm como principal *driver* o “Processo” de “Pirólise catalítica”.

O *cluster* de mesmo foco formado pelas parcerias entre *Amrita School of Engineering* (Índia) e *Karunya Institute of Technology and Sciences* (Índia); *Universitas Sains Al-Qur'na* (Indonésia); *Universitas Semarang* (Indonésia); *Universitas Muhammadiyah Purwokerto* (Indonésia) e *McGill University* (Canadá); e, por fim, *St. Peter's Institute of Higher Education & Research* (Índia); *MLR Institute of Technology* (Índia); *Sri Krishna College of Engineering*

and Technology (Índia); juntamente com a *Delhi Technological University* (Índia), teve como principal taxonomia Meso os “Produtos”, com destaque para as Micros “Caracterização”, “Diesel de pirólise” e “Aplicação” (do produto obtido em motores de compressão por ignição). As instituições também avaliaram as “Misturas” do óleo com combustíveis comerciais e/ou aditivos como sugestão de “Pós-tratamento”.

Parcerias entre empresas e universidades também se fizeram presentes nessa etapa temporal. O *Indian Institute of Technology* e o *Vellore Institute of Technology* (Índia) em conjunto com *Waste Chakra* - uma empresa especializada na fabricação de máquinas descentralizadas para plantas de pirólise de plástico -, avaliaram a pirólise catalítica de diferentes tipos de resíduos de embalagens plásticas de poliolefinas e multicamadas na presença de catalisador zeólita comercial em reator batelada piloto. Diferentes tipos de plásticos multicamadas, tais como polipropileno orientado biaxial (BOPP) e camadas de polipropileno orientadas biaxiais metalizadas (MET/BOPP), além de resíduos de plástico de poliolefinas mistas, foram pirolisados para determinar a distribuição de óleo, gás e *char*.

Ainda, a *University of Zagreb* (Croácia), a *University of Split* (Croácia) e a *University of Banja Luka* (Bósnia) em conjunto com a INA - uma empresa petrolífera de médio porte da Croácia - avaliaram a cinética da pirólise catalítica de mistura de resíduos plásticos mecanicamente não recicláveis em um reator de escala laboratorial.

A grande parceria mostrada no mapa, composta pela *Henan Agricultural University*, *Universiti Malaysia Terengganu*, *Korea University*, *Shanghai Jiao Tong University*, *University of Cambridge*; *Henan University of Technology*; *Universiti Teknologi PETRONAS*; *Sejong University* e a *The Hong Kong Polytechnic University*, todas do sudeste asiático, se propôs avaliar a pirólise de microondas a vácuo frente à pirólise convencional a fim de determinar sua viabilidade técnica e econômica no coprocessamento de plástico residual e óleo de cozinha usado, simultaneamente, para gerar combustível. Dessa forma, apresentou como principais taxonomias as Mesos “Processos” e “Produtos”.

Nenhuma representante brasileira foi encontrada nesta etapa do estudo de prospecção, mostrando, com isso, a necessidade de estudos e incentivos voltados à reciclagem química avançada no país.

7. CONCLUSÕES

O *Roadmap* Tecnológico sobre a produção de combustíveis a partir da pirólise de resíduos plásticos possibilitou a análise de variadas tendências tecnológicas para o setor, com base nas informações obtidas em fontes científicas, propriedades tecnológicas e mídias especializadas.

Foram identificados alguns tipos de “Pré-tratamentos” mecânicos, como a separação, a trituração e a limpeza dos resíduos. No entanto, no curto e no médio prazo, o pré-aquecimento, a fusão e a homogeneização da alimentação com um sistema contínuo mostraram-se como uma tendência tecnológica.

Em relação às “Matérias-primas”, as misturas de resíduos plásticos de PEAD, PEBD, PP e PS foram as que o maior número de tecnologias tinha capacidade de processar. Vale destacar as limitações em relação às cargas poliméricas de PVC e PET, tendo em vista o objetivo de produzir combustíveis e matérias-primas para monômeros. Tais limitações também ratificam a necessidade de maior desenvolvimento tecnológico em etapas de pré-tratamento da carga residual que chega às plantas de pirólise.

Quanto aos tipos de “Processos”, no estágio atual, foi verificado que a maioria dos *players* adotam a pirólise térmica como tecnologia de processamento. Entretanto, ao longo do eixo horizontal, a pirólise catalítica ganha destaque, principalmente no longo prazo, com a avaliação da influência do uso de catalisadores na qualidade do produto final e na formação de novos produtos. Como a pirólise é um sistema complexo, que é muito influenciado por condições de temperatura, pressão, taxa de aquecimento, tempo reacional e de residência, por exemplo, muitos trabalhos de médio e curto prazo também se dedicaram ao desenvolvimento e estabelecimento do processo de produção de combustíveis, com a elaboração de rotas, fluxogramas e consolidação de parâmetros operacionais.

Diversos “Produtos” foram avaliados e o destaque ao longo de todo o mapeamento foi para a fração líquida resultante, o óleo de pirólise. O diesel de pirólise também foi um dos produtos mais mencionados nos documentos. Porém, no estágio atual, os grandes atores do mercado de O&G e petroquímica estão se orientando à economia circular através de investimentos, parcerias, pesquisas e implementação de plantas pilotos e comerciais para a produção de nafta, fazendo com que a nafta de pirólise seja uma outra fonte de matéria-prima em refinarias para a produção de monômeros.

Os “Insumos de processo” ganharam destaque no médio e curto prazo pela aplicação de patentes protegendo os aparatos necessários para a construção de uma planta de pirólise, como um sistema de alimentação contínuo por extrusoras e roscas transportadoras, os próprios reatores e sistemas de remoção de *char*.

Quanto aos “Pós-tratamentos”, a destilação é tendência de longo prazo juntamente com os *blends* de combustíveis e aditivos para a aplicação dos produtos de pirólise em motores de combustão. Mas em relação à tendência de todo o mapa, outros pós-tratamentos foram destaque, como o craqueamento catalítico e etapas de purificação do óleo obtido.

Ainda, com a elaboração do *Roadmap* foram identificadas diversas instituições, como universidades, centros de pesquisa e empresas. A maioria dos *players* mostrados no mapeamento estão focados em variadas taxonomias, o que pode sugerir um interesse em inovação em diversas frentes.

Chevron, Dow, SABIC, o grupo SUEZ, *Agilyx* e *Plastic Energy* foram as empresas que mais apresentaram trabalhos no horizonte temporal estudado. Embora as três primeiras multinacionais citadas operem tradicionalmente no setor de O&G, demonstraram interesse no desenvolvimento de novas expertises na área de reciclagem química avançada. Algumas, inclusive, fizeram parcerias com empresas especializadas no setor, como a própria *Agilyx* e a *Plastic Energy*.

Também é notável que, ao longo do eixo temporal, o número de atores representantes de universidades aumenta consideravelmente, mostrando que este tipo de instituição está interessado em inovações tecnológicas na área. As representantes indianas e chinesas são as que mais estão engajadas no desenvolvimento tecnológico do setor.

Quanto ao Brasil, sua ausência no *Roadmap* comprova que o país está atrasado em relação ao tratamento de resíduos sólidos urbanos, à valorização de resíduos e à Economia Circular frente ao cenário mundial. As deficiências nas políticas públicas de RSU, a defasagem nos sistemas de coleta seletiva entre os municípios, a falta de incentivo à destinação de resíduos para além dos aterros sanitários, podem ser citados como algumas das possíveis causas da baixa exploração do tema. Entretanto, avaliando o *Roadmap* Tecnológico elaborado, é possível notar que a empresa brasileira Braskem está iniciando parcerias fora do país com empresas que já possuem conhecimento na área. Nesse contexto, com o incentivo de grandes *players* petroquímicos, é provável que novos projetos de pirólise de resíduos plásticos surjam em território nacional.

7.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se:

- Estudos voltados à modelagem e simulação do processo de pirólise de plástico;
- Mapeamento das oportunidades e dificuldades técnicas, econômicas e sociais da implementação de plantas de pirólise de resíduos plásticos no Brasil;
- Avaliação dos modelos de negócio de reciclagem química avançada que mais se adequem à realidade brasileira;
- Avaliação de impactos ambientais de plantas de pirólise de resíduos plásticos.

REFERÊNCIAS

ABRE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS. Desenvolvimento Sustentável, 2020. Disponível em: <<https://www.abre.org.br/sustentabilidade/desenvolvimento-sustentavel/>>. Acesso em 22 de julho de 2021.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019, 2019.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020, 2020.

AGUADO, J., SERRANO, D. P., ESCOLA, J. M. Chapter 3: Catalytic Upgrading of Plastic Wastes. SCHEIRS, J., KAMINSKY, W. Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels. John Wiley & Sons, Ltd, 1ª edição, 2006.

AICHE - AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Waste Plastic: Challenges and Opportunities for Chemical Industry Report, 2020.

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. Plastics: What Is Advanced Recycling?. 2020. Disponível em: <<https://plastics.americanchemistry.com/what-is-chemical-recycling/>>. Acesso em 01 de novembro de 2021.

ASSUMPÇÃO, L.C.F.N. DE REICH, M., CALDERARI, M.R.C.M., FLORES, T.M. Avaliação dos Impactos da Pirólise Catalítica de Resíduos Plásticos Pós-Consumo. Revista Processos Químicos, 12,25-36, 2018.

ATLAS DO PLÁSTICO. Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Fundação Heinrich Böll. 2020. Disponível em: <<https://br.boell.org/pt-br/2020/11/29/atlas-do-plastico/>>. Acesso em 22 de julho de 2021.

BASF. Evaluation of pyrolysis with LCA - 3 cases studies Report. 2020.

BENSON, N., BASSEY, D., PALANISAMI, T. COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint, Heliyon, 7, 2021.

BRASKEM. Mecânica, energética ou química? Como os tipos de reciclagem funcional - Bluevision, 2019.

BRITISH PLASTICS FEDERATION. Plastic Recycling. Disponível em: <https://www.bpf.co.uk/Sustainability/Plastics_Recycling.aspx>. Acesso em: 22 de julho de 2021.

BUEKENS, A. G. Chapter 1: Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. SCHEIRS, J., KAMINSKY, W. Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels. John Wiley & Sons, Ltd, 1ª edição, 2006.

BUEKENS, A. G., HUANG, H. Catalytic plastics cracking for recovery of gasoline-range hydrocarbons from municipal plastic wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 163-181, 1998.

BUTTLER, E., DEVLIN, G., MCDONNELL, K. Waste Polyolefins to Liquid Fuels via Pyrolysis: Review of Commercial State-of-the Art and Recent Laboratory Research. *Waste Biomass Valor*, 227-255, 2011.

DEMIRBAS, A. Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97-102, 2004.

DOE - DEPARTMENT OF ENERGY. Current State of the U.S. Plastic Innovation Challenge Draft *Roadmap*. 2021. Disponível em: <http://energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f14/plastic_innovation_challenge_draft_Roadmap.pdf>. Acesso em: 22 de julho de 2021.

EMBRAPA. Prospecção Tecnológica: importância, métodos e experiências da Embrapa Cerrados, 2013.

EUROPEAN PARLIAMENT. Circular economy: definition, importance and benefits. 2015. Disponível em: < <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>>. Acesso em: 26 de janeiro de 2022.

EZE, W. U., UMUNAKWE, R., OBASI, H., UGBAJA, M., UCHE, C., MADUFOR, I. Plastics waste management: A review of pyrolysis technology. *Clean Technologies and Recycling*, 1, 50-69, 2021.

GARCIA, M. L.; BRAY, O. H. Fundamentals of technology roadmapping. Sandia National Laboratories, 2007. Disponível em: <<http://prod.sandia.gov/techlib/accesscontrol.cgi/1997/970665.pdf>>. Acesso em: 15 de agosto de 2021.

GENERAL OFFICE OF THE STATE COUNCIL OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Prohibition of Foreign Garbage Entry and Promotion of Solid Waste Import Management System Reform Implementation Plan. 2017. Disponível em: <http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/27/content_5213738.htm>. Acesso em 02 de novembro de 2021 (em chinês).

GEYER, R. JAMBECK, J., LAW, K. Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Science Advances*, vol. 3, no. 7, 2017.

GRAND VIEW RESEARCH. Plastic To Fuel Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Pyrolysis, Gasification, Depolymerization), By End-fuel (Sulfur, Hydrogen, Crude Oil), By Region, And Segment Forecasts, 2021 - 2028. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/plastic-to-fuel-market>>. Acesso em 09 de novembro de 2021.

HUNDERTMARK, T., MAYER, M., MCNALLY, C., SIMONS, T., WITTE, C. How plastics waste recycling could transform the chemical industry. Disponível em:

<<https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/how-plastics-waste-recycling-could-transform-the-chemical-industry>>. Acesso em 08 de novembro de 2021.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 15270. Second edition. 2008-06-15. Plastics — Guidelines for the recovery.

JAMBECK, J. R., GEYER, R., WILCOX, C., SIEGLER, T. R., PERRYMAN M., ANDRADY, A., NARAYAN, R., LAW, K. L., Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, 768–771, 2015.

KAZA, S., YAO, L., BHADA-TATA, P., WOERDEN, F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank, Washington, DC, Estados Unidos, 2018.

KUPFER, D., TIGRE, P. B. Capítulo 2: Prospecção tecnológica. In: CARUSO, L. A.; TIGRE, P. B. Modelo SENAI de prospecção: documento metodológico. Montevideo, Uruguai, Cintefor/OIT, 2004.

LEE, R. P., MEYER, B., HUANG, Q., & VOSS, R. Sustainable waste management for zero waste cities in China: potential, challenges and opportunities. *Clean Energy*, 4(3), 169–201, 2020.

LÓPEZ, A., MARCO, I., CABALLERO, B., LARESGOITI, M., ADRADOS, A. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 62-71.

MISKOLCZI, N., BARTHA, L., DEÁK, G., JÓVER, B. Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons. *Polymer Degradation and Stability*, 357-366, 2004.

MONTEIRO, A. R. D. Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

MOREIRA, V. A. Elaboração de um *Roadmap* tecnológico: estudo de caso de elastômeros manufaturados a partir de matérias-primas renováveis. Dissertação (Mestrado em Ciências) – EPQB, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

POLI, M. *Roadmap* Tecnológico da Produção de Etanol de Segunda Geração a Partir do Bagaço e da Palha da Cana-de-Açúcar. Dissertação (Mestrado em Ciências) – EPQB, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2019.

QURESHI, M., OASMAA, A., PIHKOLA, H., DEVIATKIN, I., TENHUNEN, A., MANNILA, J., MINKKINEN, H. Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and. challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152, 2020.

PENG, Y., PEIPEI, W., SCHATUP, A., ZHANG, Y. Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean, *PNAS*, 118, 47, 2021.

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R. Technology roadmapping – A planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 71, p. 5-26, 2004.

RUBEL, H., FELDE, A., APPATHURAI, S., DÍAZ, M., JUNG, U. A Circular Solution to Plastic Waste. Disponível em: <<https://www.bcg.com/publications/2019/plastic-waste-circular-solution>>. Acesso em 08 de novembro de 2021.

SHARUDDIN, S. D. A., ABNISA, F., WAN DAUD, W.M.A. A review on pyrolysis of plastic wastes, *Energy conversion and Management*, 115, 308-326. 2016.

SCHEIRS, J. 2006. Chapter 15: Overview of Commercial Pyrolysis Processes for Waste Plastics. SCHEIRS, J., KAMINSKY, W. *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*. John Wiley & Sons, Ltd, 1ª edição, 2006.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Plastic Waste Background Report*, 2020.

WILLARD, C. *Technology Landscape: Key Players in Plastic Pyrolysis*. 2021. Disponível em: <<https://www.luxresearchinc.com/blog/key-players-in-plastic-pyrolysis>>. Acesso em 08 de novembro de 2021.

WILLARD, C. *The Pyrolysis Dilemma: to source within or go outside the established Secondary Market*. 2021. Disponível em: <<https://www.luxresearchinc.com/blog/the-pyrolysis-dilemma-to-source-within-or-go-outside-the-established-secondary-market>>. Acesso em 08 de novembro de 2021.

ANEXO 1 – ARTIGOS CIENTÍFICOS

Título do Artigo	Ano	País	Instituição
Method development and evaluation of pyrolysis oils from mixed waste plastic by GC-VUV	2021	Holanda	Dow Benelux BV; The Dow Chemical Company
To study the parameters of fuel from waste plastics	2018	Índia	SRM IST
Recycling of wastes plastics and tires from automotive industry	2021	Eslováquia	Technical University in Zvolen; Slovak University of Technology
Performance measurement on extracted bio-diesel from waste plastic	2017	Índia	St.Peter's University
Characterization of pyrolytic oil produced from waste plastic in Quezon City, Philippines using non-catalytic pyrolysis method	2021	Filipinas	Camarines Norte State College
Catalytic pyrolysis of polyolefin and multilayer packaging based waste plastics: A pilot scale study	2021	Índia	Indian Institute of Technology; Samudhyoga Waste Chakra Private Limited; Vellore Institute of Technology
Thermal degradation of waste plastics under non-sweeping atmosphere: Part 2: Effect of process temperature on product characteristics and their future applications	2020	Índia	National Institute of Technology; CSIR-Central Mechanical Engineering Research Institute
Energy, exergy and emission analysis on a DI single cylinder diesel engine using pyrolytic waste plastic oil diesel blend	2020	Índia	Veer Surendra Sai University of Technology Burla; NIT Jamshedpur; GIFT
Potentials of waste plastic pyrolysis oil as an extender fuel for diesel engine	2020	Índia	Delhi Technological University

Título do Artigo	Ano	País	Instituição
Pyro-oil and wax recovery from reclaimed plastic waste in a continuous Auger pyrolysis reactor	2020	Reino Unido	Kuwait Institute for Scientific Research (KISR); Aston University; University of Birmingham
The effect of slow pyrolysis on the conversion of packaging waste plastics (PE and PP) into fuel	2018	Índia	Indian Institute of Technology Guwahati
Performance and fuel consumption of diesel engine fueled by diesel fuel and waste plastic oil blends: An experimental investigation	2021	Indonésia / Canadá	Universitas Sains Al-Qur'na; Universitas Semarang; Universitas Muhammadiyah Purwokerto; McGill University
Synthesis of fuel oil and carbon nanotubes in an autoclave using plastic waste as precursor	2017	Índia	Visvesvaraya National Institute of Technology; Indian Institute of Science
Fuel oil generated from the cogon grass-derived Al–Si (Imperata cylindrica (L.) Beauv) catalysed pyrolysis of waste plastics	2019	Tailândia	Chulalongkorn University; Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM)
Catalytic pyrolysis of plastic waste for the production of liquid fuels for engines	2019	Tailândia	Khon Kaen University
Characteristics of fractionated drop-in liquid fuel of plastic wastes from a commercial pyrolysis plant	2021	Coréia do Sul	Korea Institute of Energy Research; Hanbat National University
Characterization of Gasoline-like Transportation Fuels Obtained by Distillation of Pyrolysis Oils from Plastic Waste Mixtures	2021	Hungria	University of Miskolc
MEA and DEE as additives on diesel engine using waste plastic oil diesel blends	2018	Índia	St. Peter's Institute of Higher Education & Research; MLR Institute of Technology; Sri Krishna College of Engineering and Technology

Título do Artigo	Ano	País	Instituição
Alternative diesel from waste plastics	2017	Grécia / Itália	Centre for Research & Technology Hellas; National Technical University of Athens; INSER SpA
Kinetics modeling of waste plastic mixture pyrolysis for liquid fuel production	2019	Indonésia	Universitas Gadjah Mada; Institut Teknologi Bandung; Agrotechnology Innovation Center, PIAT UGM
Transportation fuel from plastic: Two cases of study	2018	Itália	INSER Energia s.r.l
Thermal degradation of waste plastics under non-sweeping atmosphere: Part 1: Effect of temperature, product optimization, and degradation mechanism	2019	Índia	National Institute of Technology; CSIR-Central Mechanical Engineering Research Institute
Jet fuel and hydrogen produced from waste plastics catalytic pyrolysis with activated carbon and MgO	2020	EUA / China	Washington State University; Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering; East China University of Science and Technology; Shandong University of Technology; University of Minnesota
Thermal degradation of medical plastic waste by in-situ FTIR, TG-MS and TG-GC/MS coupled analyses	2018	China	Wuhan University of Science and Technology
Liquid oils produced from pyrolysis of plastic wastes with heat carrier in rotary kiln	2020	China	Dalian University of Technology
Derivation of synthetic fuel from waste plastic: investigation of engine operating characteristics on DI diesel engine	2021	Índia	Amrita School of Engineering, Coimbatore; Karunya Institute of Technology and Sciences
Catalytic pyrolysis of mechanically non-recyclable waste plastics mixture: Kinetics and pyrolysis in laboratory-scale reactor	2021	Croácia	University of Zagreb; University of Split; University of Banja Luka; INA-Industrija Nafta d.d.

Título do Artigo	Ano	País	Instituição
Investigation of performance, emission, combustion characteristics of municipal waste plastic oil fueled diesel engine with nano fluids	2020	Índia	Mepco Schlenk Engineering College
Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste	2017	Malásia	University of Malaya
Thermal degradation of waste plastics in a two-stage pyrolysis-catalysis reactor over core-shell type catalyst	2019	Taiwan	National Chung Hsing University; National United University
Experimental study the influence of zeolite size on low-temperature pyrolysis of low-density polyethylene plastic waste	2020	Indonésia	Faculty of Industrial Technology
Exergy and energy analysis of pyrolysis of plastic wastes in rotary kiln with heat carrier	2020	China	Dalian University of Technology
Co-pyrolysis characteristics of typical components of waste plastics in a falling film pyrolysis reactor	2018	China	Tongji University; Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd.
Conversion of waste plastic to oils for tribological applications	2020	EUA	University of Nevada
The utilisation of oils produced from plastic waste at different pyrolysis temperatures in a DI diesel engine	2017	Reino Unido	University of Surrey
Total generation and combustion emissions of plastic derived fuels: A trash to tank approach	2020	EUA	University of Kentucky

Título do Artigo	Ano	País	Instituição
Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana	2019	Gana	DAS Biogas Construction Limited; University of Cape Coast
An experimental study on thermo-catalytic pyrolysis of plastic waste using a continuous pyrolyser	2017	Austrália	Monash University
Valorization of disposable COVID-19 mask through the thermo-chemical process	2021	Coréia do Sul	Sejong University; Beijing Forestry University
Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil	2017	Arábia Saudita	King Abdulaziz University
Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis	2018	Índia	Indian Institute of Technology Guwahati
Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons	2019	EUA	East China University of Science and Technology; Washington State University; University of Minnesota
Catalytic microwave-assisted pyrolysis of plastic waste over NiO and HY for gasoline-range hydrocarbons production	2019	China	Nanjing Forestry University; University of Minnesota; Nanchang University
Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel	2020	Índia	Sathyabama Institute of Science and Technology; Coimbatore Marine College; Vel Tech Rangarajan Dr Sagunthala R&D Institute of Science and Technology; Indian Institute of Technology (IIT); Anna University
Two-stage pyrolysis of polystyrene: Pyrolysis oil as a source of fuels or benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes	2020	Coréia do Sul	University of Seoul
The Chemistry and Kinetics of Polyethylene Pyrolysis: A Process to Produce Fuels and Chemicals	2020	EUA	University of Wisconsin-Madison; Huazhong University of Science and Technology

Título do Artigo	Ano	País	Instituição
Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics	2020	Índia	National Institute of Technology; CSIR-Central Mechanical Engineering Research Institute
Characterization of fuel produced by pyrolysis of plastic film obtained of municipal solid waste	2019	Espanha	University of Granada
Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts	2017	Arábia Saudita	King Abdulaziz University; Central Metallurgical R & D Institute
Microwave vacuum pyrolysis of waste plastic and used cooking oil for simultaneous waste reduction and sustainable energy conversion: Recovery of cleaner liquid fuel and techno-economic analysis	2019	China	Henan Agricultural University; Universiti Malaysia Terengganu; Korea University; Shanghai Jiao Tong University; Universiti Malaysia Terengganu; University of Cambridge; Henan University of Technology; Universiti Teknologi PETRONAS; Sejong University; The Hong Kong Polytechnic University

ANEXO 2 – PATENTES DEPOSITADAS

Título	Titular	Ano	País
Circular Economy For Plastic Waste To Polypropylene Via Refinery Fcc Unit	Chevron U.S.A. Inc.	2021	EUA
Microwave Methods for Converting Hydrocarbon-Based Waste Materials into Oil and Gas Fuels	Resynergi, Inc.	2020	EUA
Catalytic Reactor Apparatus for Conversion of Plastics	Molecule Works Inc.	2021	EUA
Multi-Tube Pyrolysis System For Waste Plastic	Peng-Yang Lee	2021	Taiwan
Plant And Process For Pyrolysis Of Mixed Plastic Waste	Future Energy Investments Pty Ltd	2018	Austrália
Production Of Hydrocarbon Fuels From Plastics	Foy Group Limited	2017	Austrália
Pyrolysis of plastic waste into fuels to provide fuel product, comprises melting waste plastics material	Pandey G; Bajpai S; Richa; Khare S; Kamboj M; Tripathi S; Yadav A S; Maheshwari K	2020	Índia
Conversion of plastic waste to fuel used in pyrolysis, involves contacting plastic waste with transporting agent in reactor, effecting filtration of mixture, effecting thermal cracking of mixture, and flashing	Gupta K M	2020	Índia
Process for Feeding Plastic Waste Material to a Thermochemical or Pyrolysis Reactor	Exxonmobil Chemical Patents Inc	2021	EUA
Converting waste plastic material to hydrocarbon fuel products involve carrying out catalytic pyrolysis of polypropylene plastic waste in the presence of natural zeolite powder in a fix-Bed batch reactor	Neharika T G; Tushar R B ; Ashok B M; Saswati D; Kumar R; Saindane M P; Mahesh A; Patil R A; Patil K A	2019	Índia

Título	Titular	Ano	País
Method of using cost effective catalyst for enhancement of fuel fractions during thermoplastic municipal waste recycle, involves carrying out two stage fractional distillation of plastic waste to generate fuel oil	Khaladkar M; Shindikar M; Sonawane Y B	2019	Índia
Fluidized Bed Plastic Waste Pyrolysis With Screw Feeder	Exxonmobil Chemical Patents Inc.	2021	EUA
Cogeneration plant using pyrolysis of waste plastic and exhaust heat of internal combustion (IC) engine, has heat exchanger which transfers waste heat of exhaust gas of IC engine to pyrolysis reactor for facilitating pyrolysis of plastic	Geo, Edwin V Thiyagarajan, S Stanley, Jerome M Martin, Leenus Jesu M Saravanan, Cg	2021	Índia
Automatic operable converter for converting plastic wastes into fuels, comprises chambers, pipelines in between to process/pyrolysis plastic wastes, unit to reduce/depolymerize plastic wastes, and unit to form solid/liquid/gaseous fuels	Phoenix Canada Solutions Inc	2018	Canadá
Screw conveyor unit for removing char in process for conversion of waste hydrocarbon material into fuel, has screw conveyor and cooling chamber allowing heat exchange between cooling fluid and char when cooling chamber contains fluid	Suez Group	2017	França
Conversion of waste plastic material into fuel products e.g. diesel fuel products, involves heating molten waste plastic material in pyrolysis reactor to form pyrolysis gases, and cooling gases into fractions for recovery as fuel products	Future Energy Investments Pty Ltd	2019	Austrália
Novel pyrolysis method to attribute sustainable waste disposal of medical wastes in effective manner, which involves conducting engine testing for ensuring suitability of oil as alternative fuel in diesel engines	Das A K; A K P	2021	Índia

Título	Titular	Ano	País
Two-stage fractional distillation of plastic waste to generate fuel oil by separating non-plastic waste from thermoplastic waste in municipal waste and carrying out catalytic pyrolysis treatment to separate different fuel fractions	Vemuri V P B; Kumar A V; Kumari P I C; Patil S; Sharma A R; Warshetti P S; Singh Y; Sarkar B K	2019	Índia
Self-circulating thermal cracking power generation method for waste plastic renewable energy, involves connecting power generating device to thermal cracking reactor to use fuel oil	Fang H	2019	China
Method for converting plastic into fuel, involves heating contents of reactor to temperature and pyrolysis of waste plastic in oxygen free environment	Univ Bharath	2017	Índia
Waste plastic pyrolysis oil pyrolysis device has main chamber, sub-chamber and conversion chamber are sequentially connected, and condenser outlets are in communication with gas tank and fuel tank, respectively	Univ Shanghai Eng & Technology	2018	China
Continuous processing of plastic waste into fuel oil, involves melting plastic waste, pyrolyzing and recycling residual oil into crude oil, cooling and fractioning, and combusting carbon residues and portion of gas fuel as fuel	Pt Aalborg Ind Indonesia	2020	Indonésia
Vertical tubular reactor for converting household plastic wastes, such as food containers, water bottles, and packaging foam, into useful liquid fuel compounds by pyrolysis comprises internal heating element of predetermined shape	Sri Venkateshwara Eng College	2020	Índia
Method for preparing biomass-based aviation fuel using straw and waste plastic food bag, involves adding straw and food bag mixture into quartz bottle loaded with bed layers under pyrolysis, and condensing pyrolysis gas	Univ Nanchang	2018	China

Título	Titular	Ano	País
Pyrolysis-separation integrated device for directional preparation of high-value products from plastic waste, has second liquid collection tank that is connected with gas collection pipeline and pyrolysis gas circulation pipeline	Guangzhou Energy Inst Conversion Chinese; Southern Marine Sci & Eng Guangdong Lab	2021	China
Method for processing plastic waste into liquid fuel through pyrolysis process, involves carrying out condensation of result in condenser connected to output path in pyrolysis unit	Univ Ahmad Dahlan Uad	2018	Indonésia
System for converting e.g. waste plastic to useable fuel, has molten salt catalyst chamber pulling vapors from pyrolysis chamber, and distillation chambers for separating cracked vapors into paraffin, heavies, water, lights, and syngas	Combs J D	2017	EUA
Method of sustainable plastic pyrolysis, involves collecting liquid settled below in separator in separate container to be used as catalyst in process and as product, and passing and storing collected gas in cylinder for use as fuel	Eng & Technology Inst	2020	Índia
Pyrolysis of Waste Plastics in a Film Reactor	Eastman Chemical Company	2021	EUA
Pyrolysis Method and System for Variable Recycle Waste Feedstocks and Post-Industrial Liquid Wastes	Eastman Chemical Company	2021	EUA
Method for Processing Plastic Waste Pyrolysis Gas	Neste Oyj	2020	Finlândia
Circular Economy for Plastic Waste to Polypropylene and Lubricating Oil via Refinery Fcc and Isomerization Dewaxing Units	Chevron U.S.A. Inc.	2021	EUA
Fluidized Bed Plastic Waste Pyrolysis With Melt Extruder	Exxonmobil Chemical Patents Inc.	2021	EUA

ANEXO 3 – PATENTES CONCEDIDAS

Título	Depositante	Ano	País
Circular economy for plastic waste to polypropylene via refinery FCC and alkylation units	Chevron U.S.A. Inc.	2021	EUA
Circular economy for plastic waste to polyethylene via refinery crude unit	Chevron U.S.A. Inc.	2021	EUA
Conversion of waste plastic through pyrolysis to high value products like benzene and xylenes	SABIC Global Technologies, B.V	2018	Holanda
Process and system for whole tyres and plastic composites pyrolysis to fuel conversion and compound recovery	Frank Riedwald	2020	Irlanda
Process and apparatus for treating waste comprising mixed plastic waste	Recycling Technologies LTD	2020	Reino Unido
Systems and methods for recycling waste plastics, including waste polystyrene	Agilyx Corporation	2020	EUA
Recycling and recovering method and system of plastic waste product	Songpol Boonsawat	2020	EUA
Process and apparatus for producing hydrocarbon fuel from waste plastic	Virens Energy LLC	2020	EUA
Process for converting mixed waste plastic (MWP) into valuable petrochemicals	Saudi Basic Industries Corporation + Sabic Global Technologies B.V	2019	Arábia Saudita
Conversion of waste plastics material to fuel	Plastic Energy Limited	2018	Reino Unido
Refining apparatus and refining method for recycling waste plastics	GL Renewable Energy Company, Ltd	2018	Taiwan
Apparatus for pyrolyzing waste plastic into fuel	Evp Technology LLC. USA	2018	Taiwan
Plastic pyrolysis	SABIC Global Technologies B.V	2019	Holanda

Título	Depositante	Ano	País
Catalytic process of simultaneous pyrolysis of mixed plastics and dechlorination of the pyrolysis oil	SABIC Global Technologies B.V	2020	Holanda
Catalyst useful for catalytic cracking of waste plastics to produce fuel oil and catalytic pyrolysis of a mixed plastic raw material, comprises e.g. a modified pillared clay and a metal catalyst	Guangdong Acad Environmental Sci	2019	China
Wax remover for recycling oil using waste plastic, comprises pyrolysis furnace for burning fuel supplied from fuel tank by pump into burner to dissolve waste plastics, where tar separator separates tar from gas supplied from gas separator	Na M W	2019	Coréia do Sul
Pyrolysis process system used for recycling waste plastic, includes fuel gas recycling unit, heat supply unit, feeding unit for pre-processing and feeding waste plastic, and pyrolysis unit to pyrolyze waste plastic conveyed by feeding unit	Guangzhou Weigang Environmental Protecti	2020	China
Processing a plastic waste by cleaning, grinding and drying, pyrolyzing, distilling in diesel fuel, producing electricity by generating diesel fuel, and combining production of heat and electricity	TPR Soc Dune Personne A Responsabilite	2020	Bélgica
Catalyst used for pyrolysis of municipal plastic waste for producing gasoline range fuel, comprises inorganic hydroxyl group, aluminum oxide, and silicon oxide, and has preset acid dissociation constant, and total acidity to constant	Univ Petroleum & Energy Studies; Univ Petroleum & Energy Studies	2019	Índia

Título	Depositante	Ano	País
Totally converting all codes of plastic waste, excluding PVC, to thermal and/or electrical energy, involves manually cleaning and drying sorted plastic waste, shredding dried plastic, and loading shredded plastic waste into thermal reactor	Nat Inst Technology Calicut	2017	Índia
Waste plastic pyrolysis and emulsification device, has oil storage tank that stores liquefied oil in cooling condenser, and exhaust gas purification device that purifies exhaust gas discharged from heating furnace	Jung J	2020	Coréia do Sul
Device for pyrolyzing plastic waste material, comprises continuous process system comprising combustion chamber for pyrolyzing plastic waste material using rice husk fuel as heat source to produce fuel products, liquid smoke, and husk ash	Univ Sumatera	2019	Indonésia
By-product utilization device for the waste plastic pyrolysis reactor, comprises an opening and closing part that is equipped in the reactor for injecting the waste plastic, where gas exhaust port is equipped with a heating source	Net Co Ltd; Hyochun Co Ltd	2017	Coréia do Sul

Título	Depositante	Ano	País
Pyrolysis oil from low density polyethylene (LDPE) plastic waste used as fuel sources comprises oil which is produced from waste using pyrolysis reactor which is batch type reactor, cooling the pipe, and steam cooling product using water	Nugroho A S; Rahmat	2020	Indonésia
Process for thermal cracking of feedstock of e.g. mixed plastic waste materials into diesel fuels, involves returning pyrolysis gases into pyrolysis chamber, and distilling gases exiting condenser of reflux column to provide fuel products	Suez Group	2017	França
Continuous reflux reactor under pressure and controlled condenser system for thermochemical treatment of plastic and/or elastomeric waste	Valgroup S.A.	2021	Luxemburgo
Thermochemical Process for Recovering Fiberglass Reinforced Plastics Waste Matter	Korec S.r.l.	2018	Itália

ANEXO 4 – ROADMAP TECNOLÓGICO

