



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Instituto de Química

Erika Soto Miguez

***Technology Roadmap: perspectiva de inovação e avanços nas
tecnologias de reciclagem do Politereftalato de Etileno***

Rio de Janeiro
2023

Erika Soto Miguez

***Technology Roadmap: perspectiva de inovação e avanços nas tecnologias de
reciclagem do Politereftalato de Etileno***

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Área de concentração: Engenharias

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Gaya de Figueiredo

Coorientador: Prof. Dra. Ana Maria Furtado de Sousa

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/Q

M636 Miguez, Erika Soto.

Technology Roadmap: perspectiva de inovação e avanços nas tecnologias de reciclagem do Politereftalato de Etileno. – 2023.
155 f.

Orientador (a): Marco Antonio Gaya de Figueiredo
Ana Maria Furtado de Sousa

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Instituto de Química.

1. Polietileno - Reaproveitamento – Teses. 2. Gestão de resíduos – Teses. 3. Mapa Tecnológico - Teses. I. Figueiredo, Marco Antonio Gaya de. II. Sousa, Ana Maria Furtado de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Química. IV. Título.

CDU 504.06

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.



Documento assinado digitalmente
ERIKA SOTO MIGUEZ
Data: 16/05/2024 22:20:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura

16/05/2024
Data

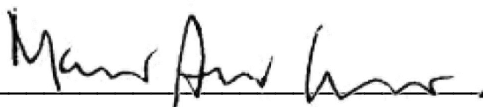
Erika Soto Miguez

**Technology Roadmap: perspectiva de inovação e avanços nas tecnologias de
reciclagem do Politereftalato de Etileno**

Dissertação apresentada, como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre, ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química, da Universidade do
Estado do Rio de Janeiro.

Área de concentração: Engenharias

Aprovada em 17 de janeiro de 2023.



Prof. Dr. Marco Antonio Gaya de Figueiredo (Orientador)

Faculdade de Química - UERJ



Documento assinado digitalmente

ANA MARIA FURTADO DE SOUSA

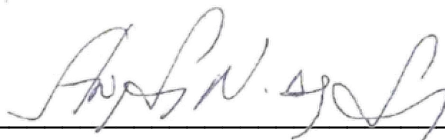
Data: 31/05/2024 16:39:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Ana Maria Furtado de Sousa (Coorientadora)

Faculdade de Química - UERJ

Banca examinadora:



Profa. Dra. Ana Lucia Nazareth da Silva

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ



Documento assinado digitalmente

ANDRE LUIS ALBERTON

Data: 04/06/2024 16:16:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Luiz Alberton

Faculdade de Química - UERJ



Prof. Dr. Harrison Lourenço Corrêa

Universidade Federal do Paraná - UFPR

Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Universidade do Estado do Rio de Janeiro, ao Instituto de Química e a todos os professores que tornaram esse mestrado uma experiência de aprendizado marcante para minha vida.

Agradeço especialmente a meus orientadores, Doutora Ana Maria Furtado de Sousa e Doutor Marco Antonio Gaya de Figueiredo por toda a atenção, conselhos e por sempre acreditarem em mim e no meu potencial durante o desenrolar deste trabalho.

Agradeço a todos os componentes da banca, pois sei que terão muito a acrescentar para o trabalho e para minha formação profissional.

Agradeço a minha mãe Maria Digna Soto Rojo e irmã Beatriz Soto Miguez, por todo o caminho já traçado e todo suporte dado para que eu estivesse aqui hoje alcançando este marco em minha vida.

Agradeço a minha amiga e chefe Marcia Cibeles Castoldi Martins por sempre me incentivar e motivar a continuar nessa jornada, mesmo quando eu achava que não seria capaz.

Não poderia esquecer dos meus companheiros de Graduação, meus amigos, meu Clã: João Victor Cordeiro, Aline Faria, Ana Luiza, Aline Borges, Juliana Bogéa, Luiz Carlos Guimarães, Victor Gomes, Gabriel Lessa, Thais Maria Gomes e Yara Dias.

Por fim, agradeço aos meus amigos Luana Gouveia, Maria Thayná e Laís Monteiro pela alegria nos momentos mais felizes e por todo apoio nos momentos mais difíceis.

O grande segredo de uma boa vida é encontrar qual é o seu destino. E realizá-lo.

Henry Ford

RESUMO

MIGUEZ, Erika Soto. *Technology Roadmap*: perspectiva de inovação e avanços nas tecnologias de reciclagem do Politereftalato de Etileno. 2023. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Produtos à base de polímeros podem ser encontrados na vida cotidiana em embalagens, vestuário, dispositivos elétricos e eletrônicos e uma variedade de aplicações industriais. Entretanto, o descarte destes produtos é particularmente difícil e, se feito de forma incorreta, pode resultar em sérios problemas ambientais. Em vez de simplesmente descartar esses materiais, pesquisa sobre seu reprocessamento tem se tornado cada vez mais relevante, ou seja, existem novos processos voltados para o reaproveitamento destes materiais de forma a reinseri-los no ciclo de produção e que buscam também otimizar os métodos já conhecidos. Motivado por esse tema, o objetivo do presente trabalho consiste em identificar as tendências tecnológicas relacionadas ao reprocessamento de polímeros, mais especificamente o Politereftalato de Etileno (PET). Para isso foi escolhida a metodologia de *technology roadmapping* (TRM) que é uma técnica flexível e amplamente utilizada na indústria para apoiar o planejamento estratégico e de longo prazo. A abordagem fornece um meio estruturado, e frequentemente gráfico, para explorar e comunicar as relações entre mercados, produtos e tecnologias em evolução e em desenvolvimento ao longo do tempo. Uma estratégia de busca e análise específica para o PET exausto foi realizada entre janeiro e abril de 2021 em bases de dados relevantes, a saber: *PatentInspiration* e *Scopus*. Um total de 431 documentos foram analisados, mas apenas aqueles considerados pertinentes ao estudo foram examinados, sendo 175 artigos científicos, 13 patentes concedidas e 28 patentes solicitadas. As informações obtidas foram dispostas no formato de um mapa indicativo de tecnologia ao longo do tempo. Observa-se no curto, médio e longo prazo: (i) a busca por tecnologias alinhadas a reciclagem terciária para lidar com o PET exausto; (ii) a preferência pela utilização do PET “puro”, ou seja, sem a presença de outros polímeros; e (iii) o foco das universidades, empresas e institutos de pesquisa na tecnologia, ou seja, em otimizar os produtos formados, reduzir os gastos com utilidades e melhorar o desempenho dos equipamentos já utilizados. Com o auxílio do TRM foi possível mapear o estado atual e prever as tendências no reprocessamento do PET exausto, de uma forma simples e visualmente conveniente, fornecendo dados importantes sobre as oportunidades e os desafios nesse setor.

Palavras-chave: politereftalato de etileno; reprocessamento; tendências tecnológicas; *technology roadmapping*

ABSTRACT

MIGUEZ, Erika Soto. *Technology Roadmap: perspective of innovation and advances in recycling technologies for Polyethylene terephthalate*. 2023. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Polymers can be found in everyday life in packaging, clothing, electrical and electronic devices, and a variety of industrial applications. However, disposal of these products is particularly difficult and, if done incorrectly, can result in serious environmental problems. Instead of simply discarding these materials, research into their reprocessing has become more important. This means that there are new ways to reuse these materials in order to reintroduce them into the manufacturing cycle and improve on existing methods. Motivated by this theme, the goal of this study is to identify technological trends in polymer reprocessing, specifically Polyethylene Terephthalate (PET). The technology roadmapping (TRM) methodology was chosen for this, as it is a versatile and widely used technique in the industry to support strategic and long-term planning. The approach provides a structured and often graphical means of exploring and communicating the evolving and developing relationships between markets, products, and technologies over time. Between January and April 2021, a specific search and analysis strategy for the worn-out PET was carried out in relevant databases, namely PatentInspiration and Scopus. A total of 431 documents were reviewed, but only those deemed pertinent to the study were examined: 175 scientific articles, 13 granted patents, and 28 requested patents. The information gathered was organized into an indicative map of technology over time and observed in the short, medium, and long term: (i) the search for technologies aligned with tertiary recycling to deal with worn-out PET; (ii) the preference for the use of “pure” PET, that is to say, without the presence of other polymers; and (iii) the focus of universities, companies and research institutes on technology, in other words, on optimizing the products formed, reducing expenses with utilities, and improving the performance of equipment already used. TRM enabled the mapping of the current state and prediction of trends in the reprocessing of worn-out PET in a simple and visually appealing manner, providing important data on the opportunities and challenges in this sector.

Keywords: polyethylene terephthalate; reprocessing; technological trends; technology roadmapping

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise das Reciclagens realizadas no período de 2017 – 2021.....	19
Figura 2 - Análise das Reciclagens realizadas ao longo dos anos.....	19
Figura 3 - Processo de <i>technology roadmap</i> de início rápido	33
Figura 4 - Esquema de Roadmap mostrando como a tecnologia pode ser alinhada ao desenvolvimento de produtos e serviços, estratégia de negócios e oportunidades de mercado	35
Figura 5 - Exemplos de technology roadmap: (a) planejamento de produto; (b) planejamento de serviço/capacidade; (c) planejamento estratégico; (d) planejamento de longo prazo; (e) planejamento de ativos de conhecimento; (f) planejamento do programa; (g) planejamento do processo; (h) planejamento de integração	36
Figura 6 - Taxonomia dos <i>Roadmaps</i>	38
Figura 7 - Fluxograma do Planejamento da Pesquisa.....	41
Figura 8 - Exemplo da colocação das linhas guias saindo das caixas de taxonomia.....	47
Figura 9 - Subdivisões da taxonomia final adotada no roadmap: Foco do Documento	48
Figura 10 - Subdivisões da taxonomia final adotada no roadmap: Tecnologia	49
Figura 11 - Subdivisões da taxonomia final adotada no roadmap: Insumos do Processo	50
Figura 12 - Visualização completa do <i>technology roadmap</i>	51
Figura 13 - Artigos científicos publicados sobre PET exausto no período de 2015 até 2020	54
Figura 14 - Artigos científicos encontrados separados pelos países de origem.....	55
Figura 15 - Artigos científicos encontrados separados pela Instituição de Origem ...	56
Figura 16 - Artigos científicos encontrados separados pelo tipo de reciclagem	57
Figura 17 - Artigos científicos encontrados separados pelo tipo de reciclagem e pelo ano de publicação	58
Figura 18 - Artigos científicos encontrados separados pelo tipo de reciclagem terciária ou química	60
Figura 19 - Fluxograma Pirólise	61
Figura 20 - Fluxograma Despolimerização.....	63
Figura 21 - Fluxograma Carbonização	64
Figura 22 - Fluxograma Glicólise.....	68

Figura 23 - Fluxograma Hidrólise	70
Figura 24 - Fluxograma Aminólise.....	72
Figura 25 - Artigos científicos encontrados separados pelo tipo de reciclagem mecânica	74
Figura 26 - Matérias-primas utilizadas nos artigos encontrados	78
Figura 27 - Patentes publicados ao longo dos anos.....	81
Figura 28 - Patentes encontradas separadas pelos países de origem.....	81
Figura 29 - Patentes encontradas separadas pela Instituição de Origem	82
Figura 30 - Patentes encontradas separadas pelo tipo de reciclagem.....	83
Figura 31 - Patentes encontradas separadas pelo tipo de reciclagem e pelo ano de deposição.....	84
Figura 32 – Patentes depositadas separados pelo tipo de reciclagem terciária.....	85
Figura 33 - Fluxograma Despolimerização Glicolítica	87
Figura 34 - Fluxograma Alcoólise.....	88
Figura 35 - Matérias-primas utilizadas nas patentes encontradas	90
Figura 36 - <i>Technology Roadmap</i> – Curto Prazo	92
Figura 37 - <i>Technology Roadmap</i> – Médio Prazo	95
Figura 38 - <i>Technology Roadmap</i> – Longo Prazo.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Palavras-chave (em inglês) utilizadas para realizar a busca pelos artigos científicos na base de pesquisa “Scopus”	44
Tabela 2 - Palavras-chave (em inglês) utilizadas para realizar a busca pelos artigos científicos no <i>Patent Inspiration</i>	45
Tabela 3 – Lista dos artigos científicos considerada para elaboração do <i>technology roadmap</i> (continua)	120
Tabela 4 - Lista das patentes considerada para elaboração do <i>technology roadmap</i> (continua)	150

LISTA DE ABREVIACÕES

BHET (bis(2-hidroxietil) tereftalato)

bioPG - Propilenoglicol renovável

CAFe - Comunidade Acadêmica Federada

EIRMA - European Industrial Research Management Association

EOP - European Patent Office

HPC - Carbono Poroso Hierárquico

INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial

LAL - L- Ácido Láctico

MDI - Difenilmetanodiisocianato

MECI - Ministério de Economia, Comércio e Indústria

MHET - mono(hidroxietil) tereftalato

NEITEC - Núcleo de Estudos Industriais e Tecnológicos

NFC - Nanofolhas de Carbono

NTC - Nanotubos de Carbono

PA - Poliamida

PBT - Polibutileno Tereftalato

PCL - Policaprolactona

PCNS - Nanofolhas de Carbono Porosa

PE - Polietileno

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEBD - Polietileno de Baixa Densidade

PELBD - Polietileno Linear de Baixa Densidade

PET - Politereftalato de Etileno

PI - Patente de Invenção

PLA - Políácido Láctico

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PSB - Poli(succinato de butileno)

PVC - Policloreto de Vinila

TPA - Ácido Tereftálico

TRM - Technology Roadmap

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
1. OBJETIVOS	22
1.1 Objetivo geral	22
1.2 Objetivos específicos	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. Polímeros	23
2.2. O descarte de produtos à base de polímeros	24
2.3. Processos de reciclagem de produtos à base de polímeros	27
2.4. Tecnologia de <i>roadmapping</i> (TRM)	30
2.4.1. <u>Definições</u>	31
2.4.2. <u>Os processos de TRM</u>	32
2.4.3. <u>Formas de Apresentação</u>	35
2.4.4. <u>Limitações e desafios da Técnica de TRM</u>	37
2.4.5. <u>Aplicações</u>	37
2.4.6. <u>Uso de TRM no Brasil</u>	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. Planejamento da pesquisa	41
3.2. Levantamento de artigos	44
3.3. Levantamento das patentes	45
3.4. Elaboração do <i>road map</i>	46
3.5. Análise dos dados	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. Prospeção tecnológica – artigos científicos	52
4.1.1 <u>Análise macro</u>	53

4.1.2 <u>Análise meso</u>	57
4.1.3 <u>Análise micro</u>	59
4.2. Prospecção tecnológica – patentes concedidas	79
4.2.1. <u>Análise macro</u>	80
4.2.2. <u>Análise meso</u>	83
4.2.3. <u>Análise micro</u>	85
4.3. Análise do <i>technology roadmap</i>	91
4.3.1. <u>Curto prazo</u>	91
4.3.2. <u>Médio prazo</u>	94
4.3.3. <u>Longo prazo</u>	96
CONCLUSÕES	99
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS	101
ANEXO A – Artigos científicos usados no trabalho como referência para prospecção tecnológica	120
ANEXO B – Patentes usadas no trabalho como referência para prospecção tecnológica	150
ANEXO C – <i>Technology roadmap</i> finalizado	155

INTRODUÇÃO

Os polímeros fazem parte da nossa vida. Sua utilização pode ser observada no dia a dia em embalagens, roupas e aparelhos elétricos, como também em aplicações industriais, automotivas, aeroespacial, médica e na agricultura. (Lettieri; Al-salem, 2011, IUPAC, 2014) As propriedades inerentes dos polímeros, dentre elas, a densidade, higroscopicidade, inflamabilidade, condutividade térmica e propriedades mecânicas (Canevarolo, 2006), trouxeram a inovação e aplicação que não eram imaginadas alguns anos atrás. Um exemplo disto é o aumento do seu uso na medicina ao longo da última década, contribuindo para a redução dos custos médicos, das doenças infecciosas e da gestão da dor. (Le Carre Latin, 2020) Sua alta flexibilidade os torna mais resistentes à ruptura, sua impermeabilidade aumenta a durabilidade dos dispositivos, pois não sofrem degradação por umidade, sua compatibilidade com ossos e tecidos moles do corpo humano, sua leveza e menor custo de manipulação justificam sua incorporação no setor médico. Os polímeros de alta tecnologia são utilizados para criar membros artificiais e os dispositivos descartáveis de entrega feitos de plástico têm tido êxito na redução do risco de infecção para os pacientes. (Le Carre Latin, 2020)

Apesar das características atrativas apresentadas dos polímeros, o seu descarte inadequado gera acúmulos em áreas de vazadouros a céu aberto, consideradas a mais danosa forma de acondicionar e dispor os resíduos e rejeitos, podendo levar a sérios problemas ambientais. (Soares, 2019) O impacto ambiental ocasionado pelo descarte indevido de resíduos é danoso para a natureza, pois gera alterações nos ecossistemas existentes através da morte de espécies importantes

para a integração e manutenção do globo terrestre. (Soares, 2019) Outro ponto é que a saúde humana é prejudicada pela exposição aos riscos causados pela disposição inadequada dos resíduos poliméricos, como, por exemplo, a contração de arboviroses, promovidas pela proliferação do mosquito *Aedes aegypti*. (Soares, 2019) Arboviroses são as doenças causadas pelos chamados arbovírus - que incluem o vírus da dengue, Zika vírus, febre chikungunya e febre amarela – a sua classificação engloba todos aqueles transmitidos por artrópodes, ou seja, insetos e aracnídeos como aranhas e carrapatos. (Morato; Figueiredo; Paiva, 2017) Isso mostra a necessidade de um descarte adequado desses produtos após o uso.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010 de 02 de agosto de 2010) foi instituída para ser um guia de descarte adequado. Ela fornece diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. (Brasil, 2010) Aterros são áreas onde todos os resíduos são enterrados de forma a ficarem isolados do meio envolvente. São a primeira e mais antiga opção de tratamento de Resíduos Sólidos como plásticos, alimentos e embalagens usadas. (Liu *et al.*, 2017a) Essa técnica pode ser combinada com a incineração para maximizar a vida útil dos aterros (ABLP, 2013) que consiste na queima de resíduos em altas temperaturas por meio de fornos. Resíduos sólidos municipais, resíduos perigosos e resíduos médicos são os tipos aos quais esse processo é mais aplicado. Essa tecnologia melhorou significativamente nos últimos anos com as mudanças substanciais nas práticas de controle e gerenciamento de emissões e cinzas. No passado, o processo de combustão era desregulado quanto ao controle de temperatura e oxigênio e, como

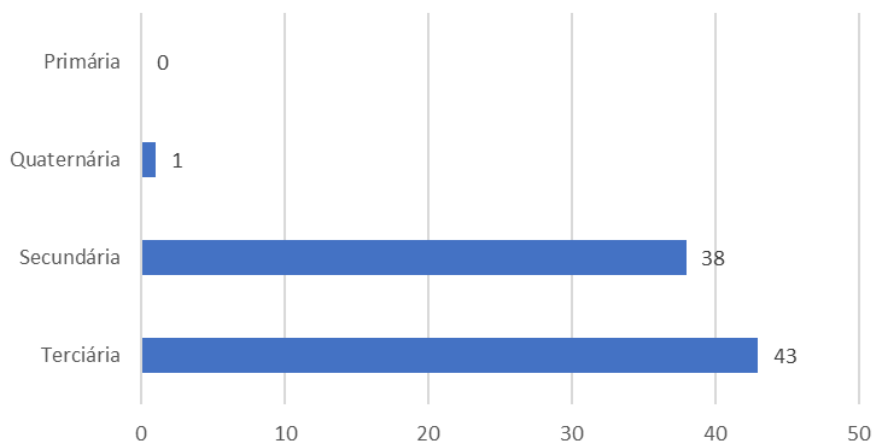
consequência, os resíduos não eram totalmente queimados. (Waste Incineration and Public Health, 2000)

Contudo, o descarte do material pode ser substituído pela sua reinserção no ciclo produtivo e consequente geração de um novo produto de maior ou menor valor agregado. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010 de 02 de agosto de 2010) definiu os conceitos de reciclagem e de logística reversa além de incentivar a sua implementação por parte das empresas. A logística reversa é definida no Título I, Capítulo II, Artigo 3º, Inciso XII, como “um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento”.(Brasil, 2010) Nessa Política foi instituído também que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de determinados resíduos sólidos são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor. Isso incentivou o investimento em P&D para restituição dos resíduos em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos. Já a reciclagem é definida no Título I, Capítulo II, Artigo 3º, Inciso XIV, como “processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas”.(Brasil, 2010) Ela pode ser classificada também quanto ao tipo de processo aplicado, sendo dividida em quatro tipos: primária, secundária, terciária e quaternária. (Radhakrishnan, 2016) Além dos benefícios ambientais, a reciclagem pode oferecer oportunidades de emprego para muitos, desde pessoal de base a pesquisadores. (Radhakrishnan, 2016)

A

Figura 1 indica, por meio de um gráfico de barras, o tipo de reciclagem abordado nos artigos encontrados na busca feita na base “Scopus”, acesso concedido pela CAPES por meio de conexão remota fornecida pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), aplicando o termo TITLE-ABS ("*recycle*" AND "*plastic*") aplicado no período de 2017 a 2021. Observa-se que, de todos os tipos de reciclagem, a secundária e a terciária foram as mais citadas em estudos nos últimos anos para lidar com polímeros descartados.

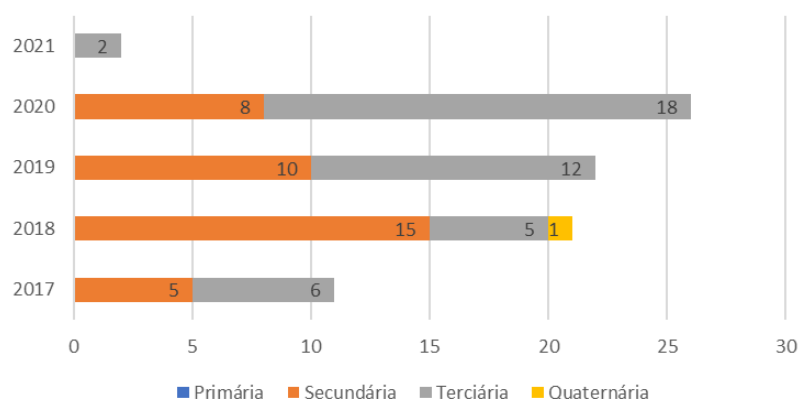
Figura 1 - Análise das Reciclagens realizadas no período de 2017 – 2021



Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Ao analisar os artigos que abordam o tipo de reciclagem empregada, observa-se a tendência da reciclagem terciária sobre as demais, caracterizada pelo aumento na sua utilização com o passar do tempo e redução das demais, conforme indica a Figura 2.

Figura 2 - Análise das Reciclagens realizadas ao longo dos anos



Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Pode ser observado também através do resultado desta busca um aumento na utilização da reciclagem secundária e terciária com o passar do tempo e redução das demais. Desde modo, a realização de um estudo aprofundado das técnicas de reprocessamento para polímeros descartados auxilia no possível direcionamento das empresas e centros de pesquisas para mitigar e prevenir os danos supracitados

JUSTIFICATIVA/INOVAÇÃO

Com base no exposto, a fim de avaliar as tendências tecnológicas usadas em polímeros descartados, propõem-se a elaboração de um *roadmap*, uma técnica de planejamento estratégico, orientada para o futuro, que visa a compreensão das relações existentes entre tecnologias, produtos e mercado ao longo do tempo. (Phaal; Farrukh; Probert, 2004)

Em estudo comandado pela MaxiQuim, empresa de avaliação de negócios na indústria química com foco em análise de mercados e competitividade, em conjunto com a Braskem revelou que a maioria do plástico reciclado tem origem no uso

doméstico (54,3%), o restante se divide entre pós-consumo não doméstico (17,3%) e resíduo pós-industrial (28,4%). Entre os plásticos pós-consumo doméstico, 44,7% eram Politereftalato de etileno (PET) e 17,5% eram Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)/ Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD). O PET também foi o material mais reciclado após o consumo não doméstico. Portanto, o presente estudo tem como foco o mapeamento das diversas tecnologias usadas para lidar com PET reciclado.

Em pesquisa realizada na base “Scopus”, cujo acesso foi concedido pela CAPES por meio de conexão remota fornecida pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), o termo TITLE-ABS ("Roadmap" AND "Plastic") foi utilizado e observou-se que apenas 03 artigos, dos 100 encontrados, abordavam esta técnica. Entretanto, para o cenário específico do presente trabalho, nada foi encontrado na literatura nos últimos cinco anos. Portanto, pretende-se atender o *gap* observado auxiliando empresas e centros de pesquisa a avaliar o seu investimento, atual e futuro, em P&D.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

Elaborar um *technology roadmap* das técnicas de reproprocessamento de Politereftalato de Etileno (PET) exaustos (ou descartados) para identificar as tendências tecnológicas e de mercado para o momento atual, curto, médio e longo prazo.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico em bases de dados Scopus no período de 5 anos em artigos sobre o reproprocessamento de PET descartados para criação de uma base sólida de conhecimento;
- Realizar um levantamento bibliográfico em bases de dados *Patent Inspiration* no período de 5 anos em patentes sobre o reproprocessamento de PET descartados para criação de uma base sólida de conhecimento;
- Elaborar um *technology roadmap* das técnicas de reproprocessamento de PET para identificar as tendências tecnológicas e de mercado para o momento atual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Polímeros

Polímeros são moléculas de alta massa molecular relativa, cuja estrutura compreende essencialmente a repetição múltipla de unidades derivadas, real ou conceitualmente, de moléculas de baixa massa molecular relativa. (IUPAC, 2014) Constituem uma das classes de materiais mais úteis e bem-sucedidas e possuem uma ampla gama de propriedades físicas. (IUPAC, 2014)

A produção de polímeros é realizada por meio do processo de “polimerização”, que pode suceder-se através da poliadição ou policondensação. A poliadição é caracterizada por não haver perda de massa na forma de compostos de baixo peso molecular. (Canevarolo, 2006) Dessa forma, assumindo-se conversão total, a massa do produto formado é igual a massa de monômero adicionado. (Canevarolo, 2006) A policondensação é caracterizada pela reação entre dois grupos funcionais reativos geralmente com a eliminação de moléculas de baixo peso molecular, como, por exemplo, água, amônio, ácido clorídrico, entre outros. (Canevarolo, 2006)

Os polímeros podem ser classificados como naturais ou sintéticos a depender da sua origem, ou ainda em termoplásticos e termofixos em relação a capacidade de reprocessamento. Os termoplásticos fundem quando aquecidos e endurecem quando resfriados o que torna esse grupo de potencialmente reciclável. (Geyer, 2020) Polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), polietileno

tereftalato (PET), poliestireno (PS) e poliamida (PA) são exemplos dessa categoria. Já os termofixos sofrem mudança química quando aquecidos, formando uma rede tridimensional irreversível e, portanto, não podem ser refundidos e reformados, o que é uma questão importante em termos de reciclabilidade. Poliuretanos (PUR), silicone e resinas epóxi são exemplos dessa categoria.(Geyer, 2020) Atualmente surgiu uma nova opção de categorização dos polímeros que é pela fonte de carbono, ou seja, “fóssil” ou “biomassa”, ou ainda, “base fóssil” e “base biológica”.(Geyer, 2020) No entanto, vale ressaltar aqui um erro comum que é pensar que todos os polímeros de base biológica são biodegradáveis. Por exemplo, o polietileno oriundo de biomassa é quimicamente idêntico ao polietileno de origem fóssil e, portanto, não é biodegradável.(Geyer, 2020)

2.2 O descarte de produtos à base de polímeros

A utilização de produtos à base de polímeros pode ser observada no dia a dia em diversas aplicações. (Lettieri; Al-salem, 2011) Por exemplo, a integração de polímeros nas formulações cosméticas permite a produção de produtos de alta performance e, portanto, os torna uma importante classe de matérias-primas. (Alves *et al.*, 2020) Sua diversidade estrutural permite a concepção de novas funções para os produtos tais como: espessantes, emulsificantes, fixadores, condicionadores e formadores de filme. (Alves *et al.*, 2020) Por fim, no ramo da engenharia, os polímeros de alta performance são muito utilizados, pois possuem propriedades como, por exemplo, resistência a temperatura de serviço mais alta em condições

extremas, boa resistência mecânica, estabilidade dimensional e resistência à degradação térmica. Isso aumenta o seu potencial de aplicação nas áreas mais desafiadoras como, por exemplo, aeroespacial, energia de defesa, eletrônica e automotiva. (Mittal, 2011)

Essa ampla gama de usos dos polímeros gera um grande volume de material a ser descartado. Esse fato preocupa porque já é sabido que o descarte inadequado traz sérios danos ao meio ambiente. (Soares, 2019) Como exemplo, cerca de 700 espécies, incluindo as ameaçadas de extinção, são afetadas pelo descarte irregular de polímeros. A maioria das mortes de animais é causada por emaranhamento ou fome. (Parker, 2019) Microplásticos, encontrados em diversas espécies aquáticas, são os maiores causadores de óbito, pois podem promover o bloqueio do trato digestivo, perfuração de órgãos e redução da vontade de comer devido ao preenchimento do estômago. (Parker, 2019) A maioria das causas de morte no ecossistema marinho são devido a ingestão de resíduos que estão dispostos no mar. (Edris Q. L. *et al.*, 2018) A saúde humana é diretamente prejudicada pela exposição aos riscos causados pela disposição inadequada destes resíduos. Quando estes materiais são descartados em áreas de vazadouros a céu aberto, por exemplo, ficam expostas às intempéries do ambiente e podem promover a proliferação do mosquito *Aedes aegypti*, devido ao acúmulo de água parada, causando a contração de arboviroses. (Soares, 2019) No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010 de 02 de agosto de 2010) foi instituída para ser um guia de descarte adequado. Ela fornece diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

Aterros são áreas onde os resíduos são colocados de forma a ficarem isolados do meio envolvente, sendo conhecido como a mais antiga opção de tratamento. (Liu *et al.*, 2017a) A degradação biológica anaeróbica produz gás de aterro e lixiviado (Liu *et al.*, 2017a), que é perigoso para o meio ambiente e pode contaminar o lençol freático se o processo não for executado de maneira adequada. O gás de aterro, em sua maioria metano (Liu *et al.*, 2017a), pode ser usado como combustível. Isso incentivou empresas a buscarem maneiras de estocar os gases resultantes da decomposição de resíduos em aterros sanitários de forma a aproveitar todos os subprodutos dessa tecnologia. (Soares, 2013) Entretanto, o tempo de descarte e o espaço necessário para a sua execução são as maiores desvantagens dessa técnica.

Visando maximizar sua vida útil, o descarte em aterros pode ser combinada com a incineração, aplicado principalmente resíduos sólidos municipais, perigosos e hospitalares. (ABLP, 2013) Apesar dos significativos avanços tecnológico, a queima incompleta desses resíduos na incineração promove a emissão de poluentes atmosféricos, como dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2). (Liu *et al.*, 2017a) Estes são responsáveis pelas chuvas ácidas e efeito estufa e precisam ser tratados de forma adequada. Atualmente, visando a solução dos problemas ambientais, o tratamento dos gases exaustos é recomendado após a utilização desse processo.

2.3 Processos de reciclagem de produtos à base de polímeros

O descarte de polímeros pode ser substituído pela sua reinserção no ciclo produtivo gerando novos produtos de maior ou menor valor agregado. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010 de 02 de agosto de 2010) definiu o conceito de reciclagem. Conforme definida no Título I, Capítulo II, Artigo 3º, Inciso XIV, entende-se por reciclagem o “processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas”.(Brasil, 2010) Ela é classificada em interna, quando os resíduos gerados são reintegrados ao processo de produção da empresa, ou externa quando é feita a reutilização de resíduos e emissões fora da empresa, podendo ainda ser classificada quanto ao tipo de processo aplicado, ou seja, primária, secundária, terciária e quaternária. (Radhakrishnan, 2016)

A reciclagem primária, também conhecida como *close-loop*, é o reprocessamento mecânico em busca de um produto com propriedades semelhantes. A reciclagem secundária, também conhecida como reciclagem mecânica, é o processo de recuperação de resíduos sólidos de plástico (PSW) para o reaproveitamento na fabricação de produtos, com propriedades de grau inferior, por meios mecânicos. (Radhakrishnan, 2016) Esta é considerada uma das formas mais econômicas de reciclar o material exausto. (Gopinath *et al.*, 2020)

A reciclagem terciária, também conhecida como reciclagem química, é o processo de conversão em moléculas menores adequadas para uso como matéria-prima para a produção de novos produtos petroquímicos e plásticos. A reciclagem quaternária é a recuperação de energia ou a produção de energia a partir da

decomposição de resíduos ou por tratamento biológico com digestão anaeróbia. Além dos benefícios ambientais, a reciclagem pode oferecer oportunidades de emprego. (Radhakrishnan, 2016)

Dentro da reciclagem química, Singh et al (2022) estudaram um processo de pirólise em duas etapas para recuperação de produtos e produção de nanotubos de carbono (NTC) utilizando os gases gerados após a pirólise de lixo plástico, contendo polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) e poliestireno (PS). Primeiramente, o plástico foi pirolisado em um ambiente catalítico e não catalítico para analisar o efeito de um catalisador no rendimento dos produtos da pirólise e suas propriedades como gases não condensáveis. Na segunda etapa, os gases pirolíticos obtidos foram utilizados para a síntese dos NTCs sobre o catalisador à base de metal em um forno de tubo de quartzo horizontal a altas temperaturas. Finalmente, o crescimento dos NTCs ocorreu via deposição de vapor químico (CVD). Estes são considerados produtos de alto valor agregado e tornam o processo de pirólise mais competitivo e sustentável quando comparado às demais tecnologias utilizadas para reciclagem terciária.

Liu et al (2020) analisaram a conversão de resíduos plásticos, em específico garrafas de polietileno tereftalato (PET), em carbono poroso hierárquico (HPC) através da carbonização a baixa temperatura em atmosfera neutra, sem presença de outros gases. Após sua carbonização inicial, o carbono resultante passa pelo processo de sonicação, processo de aplicação de energia sonora para agitar partículas ou fibras descontínuas em um líquido (Deborah D.L Chung, 2017), e posterior ativação em forno para formação de HPC. Esta é uma nova maneira reciclar resíduos plásticos para um melhor ambiente ecológico e produção de material de armazenamento de energia. Sua alta porosidade, estabilidade

química/térmica e baixo custo tornam promissora a utilização de HPCs como materiais de armazenamento de energia capacitiva superior.

Basha, Sulaiman e Uemura (2020) investigaram o desempenho da co-gaseificação do óleo de Palm Kernel Shell (PKS) - selecionado devido ao seu alto teor de energia - e poliestireno (PS) - amplamente utilizado no mercado interno e na indústria de embalagens - com diferentes condições de operação. O alto custo de reciclagem do poliestireno dificulta o gerenciamento dos seus resíduos. Entretanto, esse fator econômico pode ser compensado pelo processo proposto pelos autores uma vez que o alto poder calorífico do gás resultante o torna adequado para uso como combustível.

Nomura et al (2020) descrevem a síntese de novos copolímeros multibloco de polietileno tereftalato - polietileno (PET-PE MBCPs) e avaliam sua utilidade como camadas adesivas em filmes multicamadas e aditivos compatibilizantes para misturas reprocessadas por fusão. O PET e o PE foram escolhidos neste estudo porque são os polímeros comerciais mais prevalentes e fluxos de resíduos de alto volume. O trabalho conclui que PET-PE MBCPs servem como camadas adesivas eficazes entre filmes de PET/PE puros com força adesiva comparável à de adesivos disponíveis comercialmente.

Monsigny, Berthet e Cantat (2018) estudaram a despolimerização de resíduos plásticos por meio de hidrossilação catalítica. Esse processo é muito utilizado para reciclagem de poliésteres – como, por exemplo, polietileno tereftalato (PET), Policaprolactona (PCL) e Poliacido Lático (PLA) – e policarbonatos. Este método possui como vantagem a regeneração dos resíduos em monômeros originais ou produtos químicos na sua forma pura. Entretanto, o consumo intensivo de energia combinada com a geração de subprodutos de silício exige métodos alternativos de

redução. Desta forma, substitutos de hidrossilanos podem oferecer alternativas promissoras no futuro usando fontes renováveis de hidretos com, por exemplo, ácido fórmico.

2.4 Tecnologia de *roadmapping* (TRM)

As primeiras abordagens associadas a Tecnologia de *Roadmapping* foram defendidas por Motorola e Corning no final dos anos 1970 e início dos anos 1980, respectivamente. (Probert; Radnor, 2003) Corning fez o mapeamento de eventos críticos para a estratégia corporativa e Motorola empreendeu uma evolução tecnológica e uma abordagem de posicionamento. (Probert; Radnor, 2003) A abordagem de Motorola, mais visível nos Estados Unidos, promoveu à adoção do conceito no setor de eletrônicos de consumo, principalmente Philips, Lucent Technologies e SIA. (Phaal; Farrukh; Probert, 2004)

Várias empresas europeias adotaram o conceito. A EIRMA (European Industrial Research Management Association) documentou em 1997 um processo de oito etapas baseado nas experiências de cerca de 25 empresas. (Probert; Radnor, 2003) Essa exposição levou à adoção mais ampla desta abordagem por consórcios e governos para apoiar a colaboração de pesquisa em nível setorial. (Phaal; Farrukh; Probert, 2004)

Atualmente, alguns governos – Departamentos de Agricultura e de Energia dos Estados Unidos, Departamento de Indústria Australiano e o Ministério de Economia, Comércio e Indústria (MECI) japonês – desenvolvem normas de

utilização e institucionalizam o *roadmapping* como mecanismo de desenvolvimento de diretrizes públicas para setores industriais. (Melo Filho, 2015)

2.4.1. Definições

Segundo Phaal, Farrukh e Probert (2004), o TRM é uma técnica de planejamento estratégico, orientada para o futuro, que visa a compreensão das relações existentes entre tecnologias, produtos e mercado ao longo do tempo. Identificar tecnologias emergentes, que sejam melhorias ou disruptivas, é crucial para a sobrevivência em mercados devido a importância estratégica da tecnologia na entrega de valor e vantagem competitiva para suas empresas e as redes industriais em que operam.

De acordo com Kappel (2001) devido à popularização da técnica de TRM, a nomenclatura utilizada e sua definição têm sido abordadas de diversas formas. Na literatura, os termos usados em inglês são “technology roadmapping”, “technology roadmap”, “roadmapping” e “roadmap”. (Lee; Park, 2005) Uma diferenciação comumente feita é usar o termo “roadmapping” para definir o processo e “roadmap” para definir o documento gerado ao final do processo (Kappel*, 2001). Portanto, neste trabalho, será utilizado o termo technology roadmapping (TRM) para o método e roadmap para se referir ao mapa final.

2.4.2. Os processos de TRM

O termo *technology roadmapping* faz referência a um conjunto de técnicas e abordagens semelhantes. Garcia e Bray (1997) propuseram que o processo de TRM fosse estruturado em três fases, conforme discriminação abaixo.

1) Fase I – Atividades Preliminares

- Satisfazer condições essenciais;
- Fornecer liderança/patrocínio;
- Definir o escopo e os limites.

2) Fase II – Desenvolvimento do Technology Roadmap

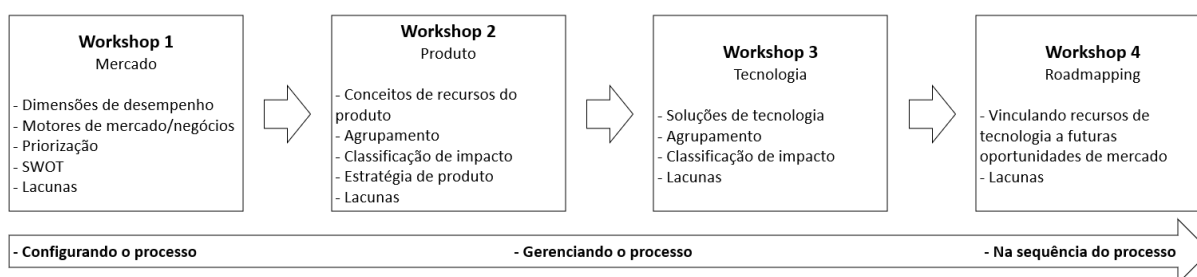
- Identificar o "produto" que será o foco do roteiro;
- Identificar os requisitos críticos do sistema e os seus objetivos;
- Especificar as principais áreas de tecnologia;
- Especificar os direcionadores da tecnologia e seus alvos;
- Identificar alternativas tecnológicas e suas linhas de tempo;
- Recomendar as alternativas tecnológicas que devem ser seguidas;
- Criar o relatório do roadmap.

3) Fase III – Atividade de Acompanhamento

- Criticar e validar o roteiro;
- Desenvolver um plano de implementação;
- Revisão e atualização.

Phaal, Farrukh e Probert (2001) desenvolveram um processo padrão, chamado de *T-Plan*, que compreende quatro workshops, no qual os três primeiros com foco nas três camadas principais do roteiro (mercado/negócio, produto/serviço e tecnologia) e o workshop final reunindo as camadas em uma base de tempo para construção do gráfico, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Processo de *technology roadmap* de início rápido



Fonte: Modificado pela Autora a partir de Phaal; Farrukh; Probert, 2001

Meissner, Gokhberg e Sokolov (2013), no livro “Science, Technology and Innovation Policy for the Future: Potentials and Limits of Foresight Studies”, utilizam duas formas principais de abordagem para o método de TRM: uma orientada para o mercado e a outra orientada para a tecnologia. A abordagem orientada para o mercado pressupõe que o primeiro ponto da análise seja uma demanda de mercado, enquanto a abordagem orientada para a tecnologia identifica novas tecnologias e busca definir as necessidades de mercado que poderiam ser atendidas por elas.

Ilevbare, Probert e Phaal (2014) analisaram diferentes processos contidos na bibliografia e chegaram à conclusão de que existem quatro etapas genéricas para o processo de TRM, são elas:

- 1) Iniciação e planejamento;

- 2) Entrada e análise;
- 3) Síntese do roadmap e saída; e
- 4) Implementação do roadmap.

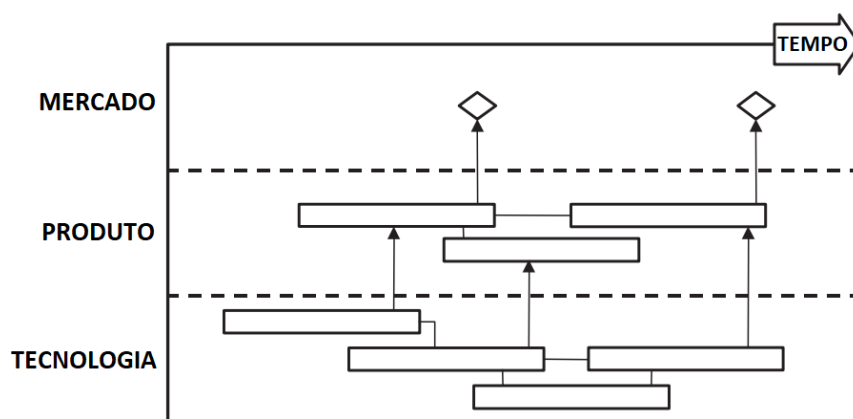
A primeira etapa é realizada em workshops onde tem-se a participação de um grupo de especialistas e seus esforços cognitivos são combinados para entrada e análise de dados. Nesta parte observa-se a divergência de opiniões, que se refere à captura e exploração do conhecimento e da informação, e a convergência, que se refere à análise e redução do conhecimento ao mais essencial para a análise em questão. Esse processo é importante, pois garante a conversão do fluxo de informações em uma seleção democrática. A terceira etapa consiste na elaboração gráfica do roadmap e a última etapa envolve a implantação dos resultados e das ideias geradas no planejamento da organização.

O presente trabalho utiliza a mesma abordagem apresentada por Neumann (2016), ou seja, realização de um levantamento bibliográfico dos documentos por meio de buscas utilizando palavras-chave em uma base de dados confiável. Essas informações são organizadas no formato do roadmap, separadas no tempo: curto prazo, médio prazo e longo prazo. Assim, tem-se a opinião expressa exclusivamente pelo material publicado, de forma mais quantitativa, além de uma possível correlação com o mercado quando se utiliza as patentes para a análise das tecnologias.

2.4.3. Formas de Apresentação

De acordo com Phaal, Farrukh e Probert (2004), a abordagem mais comum é uma forma genérica proposta pela *European Industrial Research Management Association* (EIRMA), uma organização não governamental. O roteiro genérico é um gráfico baseado no tempo que compreende várias camadas que incluem perspectivas comerciais e tecnológicas, conforme ilustrado na Figura 4.

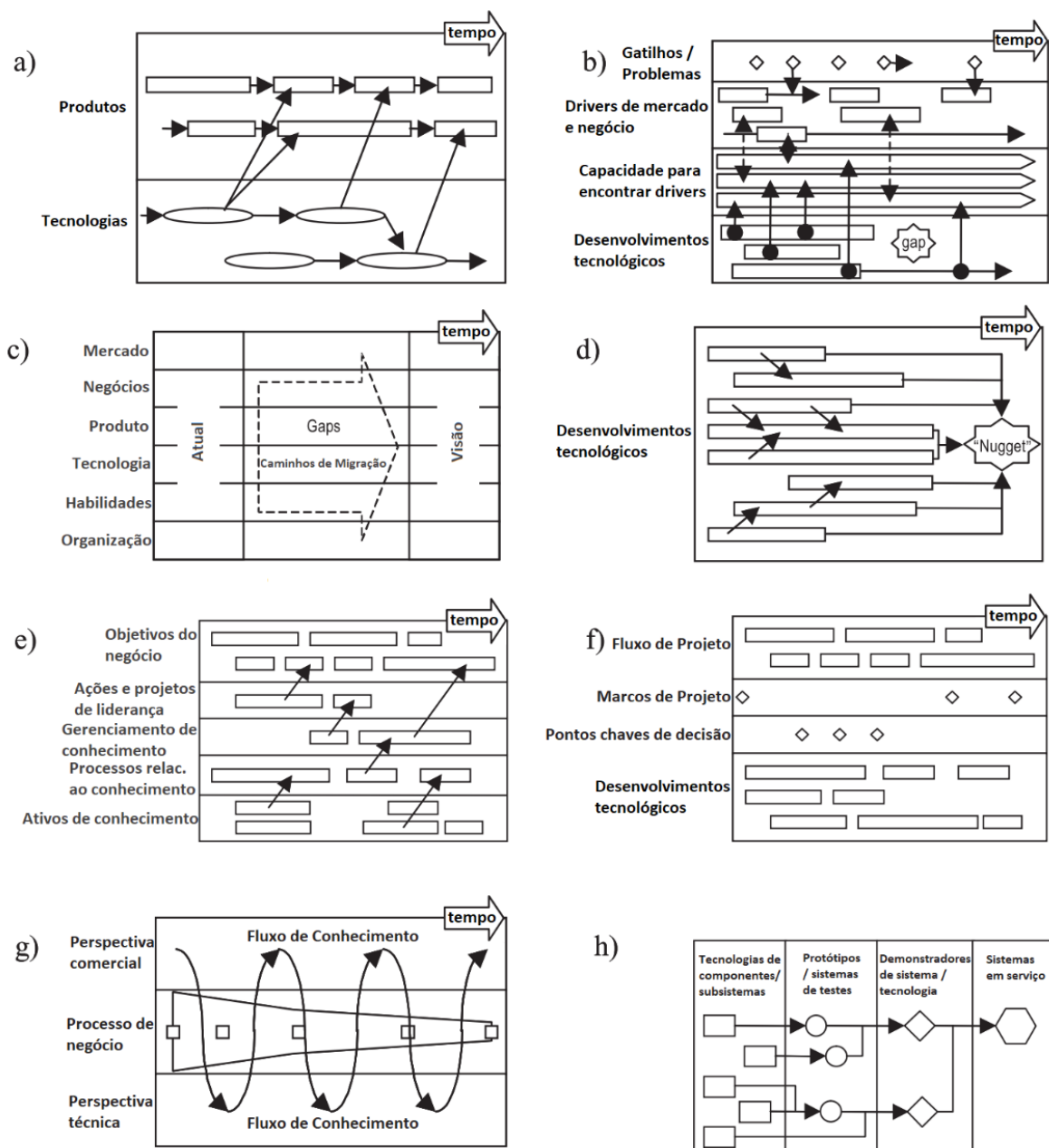
Figura 4 - Esquema de Roadmap mostrando como a tecnologia pode ser alinhada ao desenvolvimento de produtos e serviços, estratégia de negócios e oportunidades de mercado



Fonte: Modificado pela Autora a partir de Phaal; Farrukh; Probert, 2004

Phaal, Farrukh e Probert (2004) analisaram aproximadamente 40 roadmaps com o objetivo de identificar os diferentes formatos que eram usados de acordo com o propósito do estudo. A Figura 5 ilustra exemplos de *technology roadmap* reportados na literatura.

Figura 5 - Exemplos de technology roadmap: (a) planejamento de produto; (b) planejamento de serviço/capacidade; (c) planejamento estratégico; (d) planejamento de longo prazo; (e) planejamento de ativos de conhecimento; (f) planejamento do programa; (g) planejamento do processo; (h) planejamento de integração



Fonte: Modificado pela Autora a partir de Phaal; Farrukh; Probert, 2004

2.4.4. Limitações e desafios da Técnica de TRM

Assim como todas as técnicas de prospecção tecnológica, o TRM possuiu suas limitações e seus desafios. Garcia e Bray (1997) e Phaal, Farrukh e Probert (2001) afirmam que o processo de TRM é cíclico e precisa ser revisado e atualizado constantemente. Lee e Park (2005) realizaram uma pesquisa sobre software de *roadmapping* e reportaram que 65% dos entrevistados afirmaram que a existência de um software especializado seria capaz de ajudar a superar o problema causado pela falta de ferramentas, técnicas e métodos. Ilevbare, Probert e Phaal (2014) apontam que uma das limitações do processo é a falta de consciência acerca de riscos e incertezas, aspectos fundamentais para o planejamento estratégico. Eles avaliaram cerca de 600 roadmaps publicados e perceberam que a presença de riscos e/ou incertezas analisados para as tecnologias eram listadas claramente em apenas 10%. De acordo com Neumann (2016) é preciso avaliar cada caso para determinar se as limitações e desafios supracitadas poderão afetar o trabalho. Porém, a técnica foi e é muito aplicada em diversos casos, para vários objetivos diferentes.

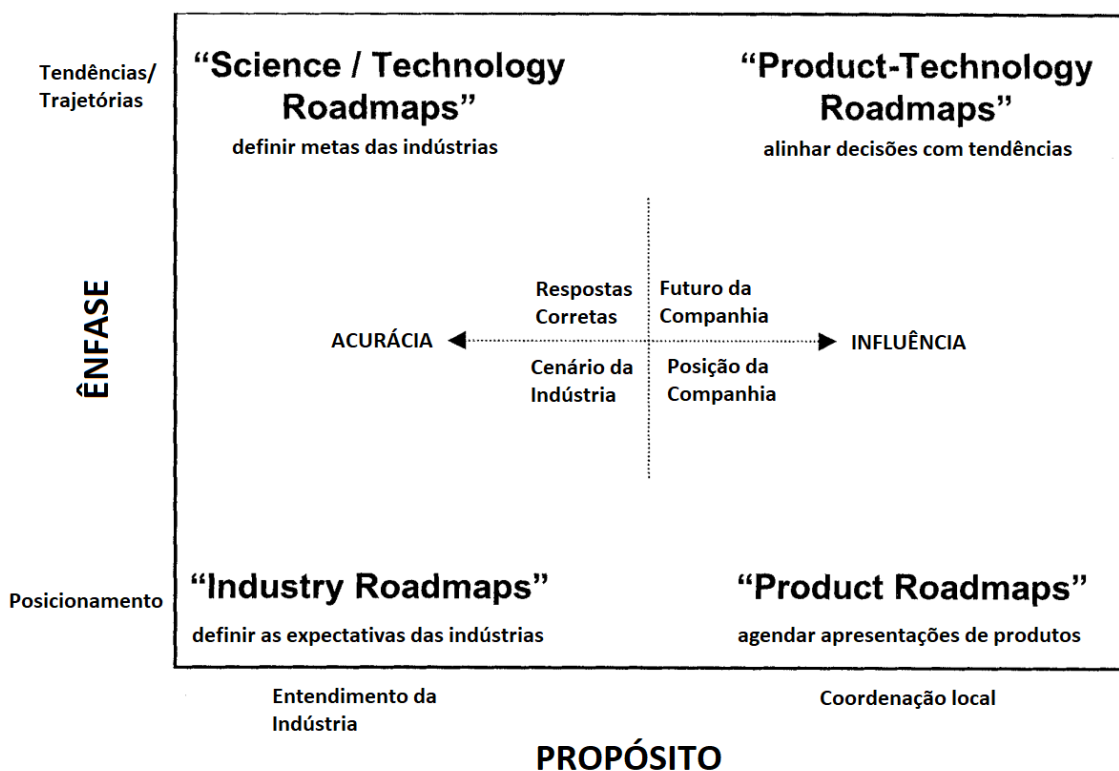
2.4.5. Aplicações

De acordo com Lee e Park (2005) o roadmap pode ser usado em muitas áreas como, por exemplo: planejamento de produtos físicos e de serviços, desenvolvimento de árvore genealógica de produtos e planejamento de programas. Kappel (2001) afirma que os roadmaps de tecnologia são usados no cenário

corporativo para definir o plano de evolução de um produto de forma a vincular a estratégia de negócios à evolução das características do produto. Já para Phaal, Farrukh e Probert (2004) o seu principal papel é apoiar o gerenciamento e o planejamento de tecnologia.

Entretanto, muitas outras abordagens com dimensão de planejamento, como planejamento de cenários, *backcasting*, estão intimamente relacionadas a este processo. (Lee; Park, 2005) Kappel (2001) se utiliza da própria taxonomia do *roadmapping* para abordar as possíveis aplicações. Conforme pode ser observado na Figura 6, o eixo horizontal delinea entre o roteiro feito para insights no nível da indústria ou para coordenação no nível da empresa, enquanto o eixo vertical os diferencia pela ênfase do conteúdo, seja em tendências específicas ou no posicionamento dentro de uma indústria.

Figura 6 - Taxonomia dos *Roadmaps*



Fonte: Modificado pela Autora a partir de Kappel, 2001

De acordo com Neumann (2016), o Brasil se encontra na lista de governos e de centros de pesquisa que utilizam o método de TRM para atingir objetivos variados.

2.4.6. Uso de TRM no Brasil

O NEITEC (Núcleo de Estudos Industriais e Tecnológicos), coordenado pela professora Suzana Borschiver, atuou em parceria com o SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) para mapear as tecnologias e as tendências de mercado para nas áreas de: Adesivos, Tintas, Polímeros, BioMateriais, Automação, Robótica, Tintas Sustentáveis e Inteligentes, Elastômeros e Compósitos. (NÚCLEO DE ESTUDOS INDUSTRIAIS E TECNOLÓGICOS, 2015) Esses e outros trabalhos realizados pelo NEITEC são explorados no livro publicado pela professora, intitulado “TECHNOLOGY ROADMAP - Planejamento Estratégico para alinhar Mercado-Produto-Tecnologia”. (Borschiver; da Silva, 2016)

Coutinho e Bomtempo (2011) utilizaram a técnica de TRM para analisar a aplicação da bioeconomia no Brasil através de um estudo, em parceria com a empresa Braskem, sobre a dinâmica da inovação em matérias-primas renováveis presentes no país para auxiliar na construção de novas políticas e adoção de diferentes estratégias para os setores da indústria química e de energia.

Melo Filho (2015) analisou o processo de utilização da abordagem de roadmapping na geração de diretrizes de inovação para conglomerados industriais.

Em sua tese foram realizados dois estudos de casos de programas promovidos por organizações de apoio empresarial, com o suporte da universidade e do governo do estado, para o planejamento estratégico normativo e coletivo de conglomerados industriais localizados no estado de Minas Gerais, Brasil. Este trabalho chegou à conclusão de que o uso desta técnica influenciou os sistemas de inovação, mesmo não instituídos, e, também, auxiliou a organização e governança dos conglomerados.

Já Neumann (2016) utilizou da mesma técnica para identificar as organizações atuantes e o conhecimento tecnológico acerca do Propileno glicol Renovável (bioPG) no Brasil e no mundo. Em sua tese foi possível mapear o estado atual e prever as tendências na produção do bioPG de uma maneira simples e visualmente conveniente, fornecendo dados importantes sobre oportunidades e desafios no setor.

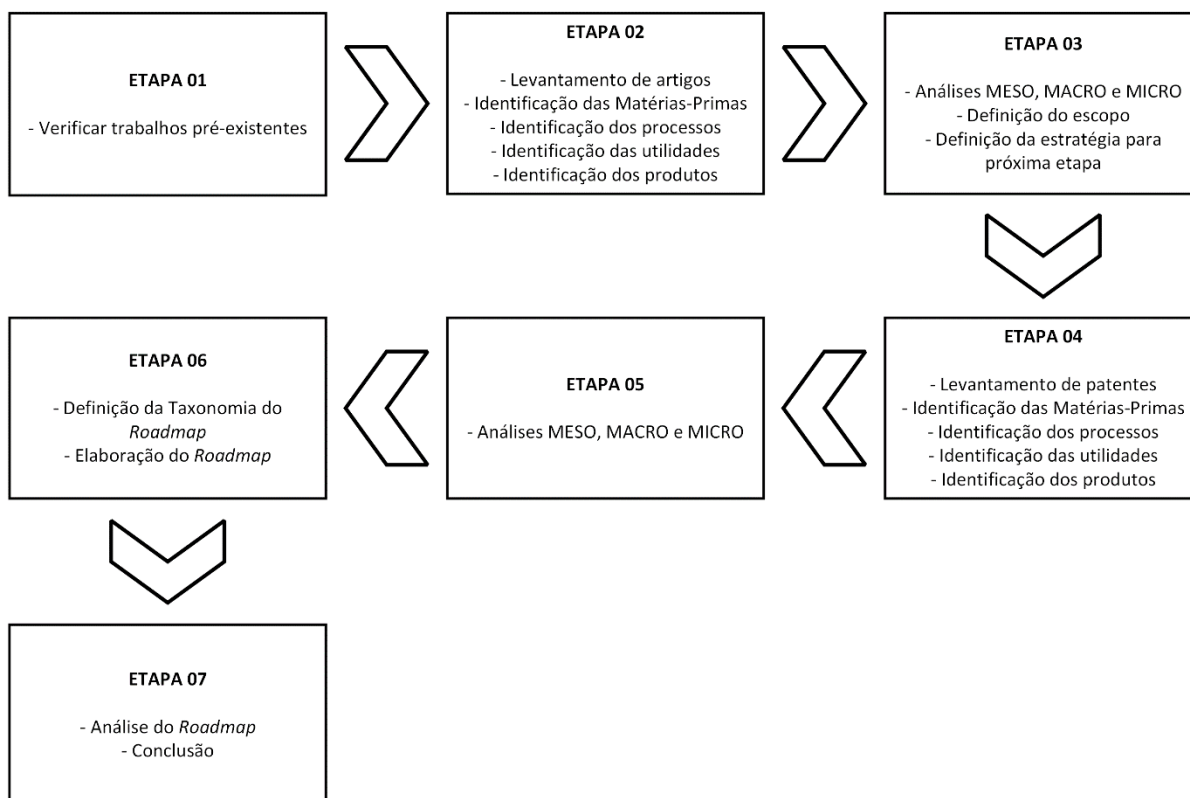
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a construção do *technology roadmap* acerca das técnicas de reprocessamento de Politereftalato de Etileno (PET).

3.1 Planejamento da pesquisa

Todas as etapas para a construção do roadmap, presentes no fluxograma da Figura 7, serão detalhadas nesta seção.

Figura 7 - Fluxograma do Planejamento da Pesquisa



Fonte: Autora, 2022

A Etapa 01 consiste na verificação de trabalhos pré-existentes dentro do escopo proposto. Conforme detalhado na seção de “Justificativa/Inovação”, a base “Scopus” foi usada para realizar uma pesquisa preliminar sobre roadmaps de reprocessamento de polímeros. As palavras-chaves "Roadmap" e "Plastic" foram utilizadas como filtro dentro da plataforma.

A Etapa 02 consiste no levantamento de artigos dentro do escopo proposto. A base “Scopus” foi escolhida para realizar as pesquisas sobre as tecnologias usadas para reprocessamento de polímeros. Essa etapa promove o levantamento das tecnologias “a longo prazo”, pois encontram-se ainda em desenvolvimento e, caso apresentem resultados desejáveis, podem ser patenteados e/ou inseridos nos processos industriais. Ainda nesta etapa, todos os documentos selecionados foram analisados visando a identificação da matéria-prima usada, do produto gerado, as utilidades necessárias para realização do processo e, por fim, do processo utilizado para reprocessar os polímeros.

Na Etapa 03 as informações identificadas na etapa anterior são utilizadas para analisar o escopo atual e verificar a necessidade de alteração e, também, para elaborar a estratégia a ser usada na busca de patentes. Ainda nesta etapa, são realizadas as análises discriminadas abaixo:

- Macro: são organizadas, analisadas e separadas as informações mais gerais dos documentos, como país de origem, ano de publicação, jornais e revistas, além das instituições (universidade, centro de pesquisa ou empresa);
- Meso: os documentos são separados em diferentes categorias, denominadas taxonomias, que são definidas pelos aspectos mais relevantes das tecnologias encontrados nos documentos sobre o tema;

- Micro: é feito um detalhamento das taxonomias mais gerais adotadas na análise Meso. São analisadas as tecnologias específicas, produtos ou processos adotados em cada um dos documentos analisados.

A Etapa 04 é similar à segunda, mas os documentos levantados são patentes. A base “PatentInspiration” foi escolhida para realizar as pesquisas sobre as tecnologias usadas para reprocessamento de polímeros. Essa etapa promove o levantamento das tecnologias “a curto prazo”, pois já estão inseridas nos processos industriais. Ainda nesta etapa, todos os documentos selecionados foram analisados visando a identificação da matéria-prima usada, do produto gerado, as utilidades necessárias para realização do processo e, por fim, do processo utilizado para reprocessar os polímeros.

Na Etapa 05 as informações identificadas na etapa anterior são utilizadas para analisar o escopo atual e verificar a necessidade de alteração. Nesta etapa também são realizadas as análises macro, meso e micro – já explicadas anteriormente – nos documentos selecionados na quarta etapa.

Na Etapa 06 é escolhida a taxonomia que será utilizada no mapa e todo o conhecimento é organizado em tendências e separado de acordo com uma evolução temporal. É o momento de elaboração e construção do technology roadmap.

Na Etapa 07 é realizada a análise do roadmap elaborado. Nesta etapa é possível determinar as tendências mercadológicas para o reprocessamento de polímeros reciclados e definir os possíveis players que serão responsáveis pela mudança no cenário atual.

3.2 Levantamento de artigos

A base de pesquisa “Scopus” foi a plataforma escolhida devido ao seu extenso acervo com mais de 25 mil títulos disponíveis para consulta e 12 editoras indexadas, entre elas Elsevier, Springer, Wiley-Blackwell, Taylor & Francis e Sage. O acesso a base foi concedido pela CAPES por meio de conexão remota fornecida pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). A busca foi realizada com os seguintes critérios:

- Data da análise: Abril de 2021;
- Período Analisado: Janeiro de 2021 a Janeiro de 2015 (seis anos);
- Tipo de Documentos: Artigo Científico;
- Parte do documento onde foi feita a busca: Título, Resumo e Palavras-Chave.

A Tabela 1 apresenta um exemplo de critério de busca de artigos e total de documentos encontrados e relevantes.

Tabela 1 - Palavras-chave (em inglês) utilizadas para realizar a busca pelos artigos científicos na base de pesquisa “Scopus”

<i>Busca Avançada por Palavras-chave</i>	Total de documentos / Documentos relevantes
<i>TITLE-ABS ("waste Polyethylene terephthalate" OR "waste PET" OR "recycle Polyethylene terephthalate" OR "recycle PET") AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015))</i>	304 / 175

Fonte: Autora, 2022

3.3 Levantamento das patentes

A base de pesquisa "*Patent Inspiration*", cujo acesso de maior parte das funcionalidades é gratuito, foi a plataforma escolhida por ser um banco de dados visualmente orientado e fácil de usar, possui um acervo de 69 milhões que é atualizado semanalmente e baseado no banco de dados do *European Patent Office* (EPO) e contém dados bibliográficos de mais de 90 países. A plataforma utiliza visualizações vibrantes e interativas para transmitir dados de patentes e proporciona aos seus usuários controle total das visualizações, legendas adaptáveis, títulos, campos de pesquisa e tipos de gráficos facilmente exportáveis. A busca foi realizada com os seguintes critérios:

- Data da análise: Julho de 2021;
- Período Analisado: Janeiro de 2021 a Janeiro de 2017 (quatro anos);
- Tipo de Documentos: Patentes Concedidas;
- Parte do documento onde foi feita a busca: Resumo (Abstract) e Reivindicações (Claim).

A Tabela 2 apresenta um exemplo de critério de busca de patentes e total de documentos encontrados e relevantes.

Tabela 2 - Palavras-chave (em inglês) utilizadas para realizar a busca pelos artigos científicos no *Patent Inspiration*

Busca Avançada por Palavras-chave	Total de documentos / Documentos relevantes
AB: ("Polyethylene" OR "Polyethylene terephthalate" OR "Polyvinyl Chloride" OR "Polypropylene" OR "Polystyrene" OR "Low-Density Polyethylene" OR "Medium-Density Polyethylene" OR "High-Density	127 / 95

Polyethylene" OR "Ultra High Molecular Weight Polyethylene") AND AB:("waste" OR "recycling") AND IC:(C10B53/00 OR B09B3/00 OR C10G1/00 OR C10B57/00) AND DP:([01.01.2017 TO 01.01.2021])

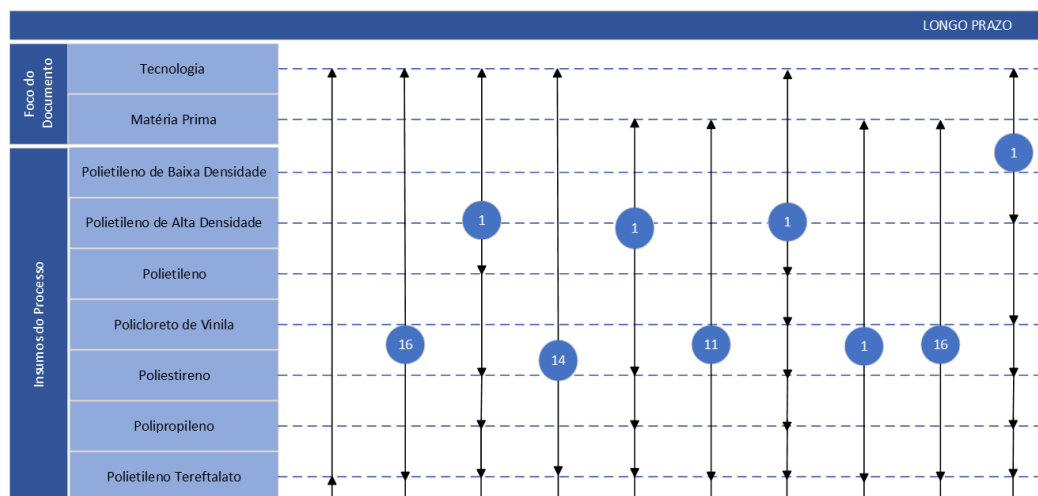
Fonte: Autora, 2022

3.4 Elaboração do road map

Seguindo com a metodologia descrita para este estudo, nesta seção é abordada a montagem do *roadmap*. É a etapa de organizar a inteligência adquirida pela prospecção tecnológica, colocando-a na forma de um mapa dividido nos eixos horizontal (tempo) e vertical (taxonomias).

As taxonomias finais - Foco do Documento, Insumos do Processo e Tecnologia - foram selecionadas de modo a organizar a informação em um formato visual de mapa e estão empilhadas em caixas na vertical no início do documento, de onde são traçadas linhas guias na horizontal, que servem de ponto final (intercessão) para as setas indicativas. O número de documentos com mesmo foco é indicado por meio de um círculo de onde são traçadas as setas indicativas. A Figura 8 apresenta um exemplo da organização adotada neste estudo para a elaboração do roadmap.

Figura 8 - Exemplo da colocação das linhas guias saindo das caixas de taxonomia



Todas as informações contidas no *roadmap* são prioritariamente voltadas à tecnologia, como o próprio nome esclarece, porém, pode-se especificar o foco da informação presente nos documentos. Neste trabalho tem-se dois tipos de foco:

- Na tecnologia, onde o documento - artigo ou patente - possui como seu principal objetivo descrever o processo utilizado e/ou desenvolvido sem grande enfoque na matéria-prima a ser utilizada; e
- Na matéria-prima, onde é relatado prioritariamente a respeito do PET e como a tecnologia presente no estudo pode ser aplicada no seu reprocessamento pós consumo.

A Figura 9 apresenta a representação das taxonomias discriminadas acima para analisar o foco dos documentos selecionados.

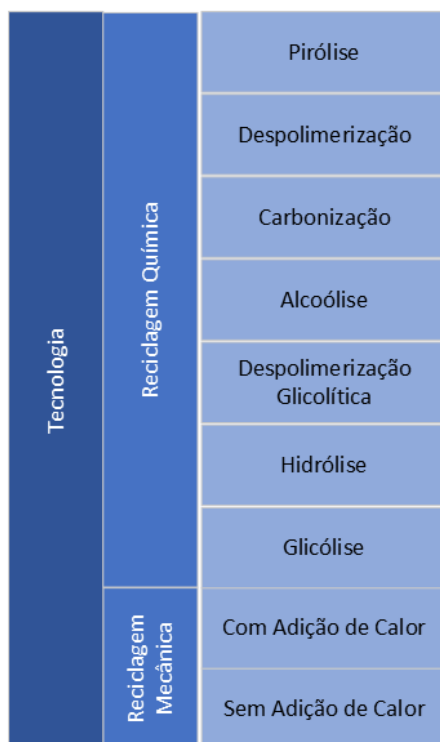
Figura 9 - Subdivisões da taxonomia final adotada no roadmap: Foco do Documento



Fonte: A Autora, 2022

Para identificar os principais processos adotados pelos documentos foi criada uma taxonomia geral denominada “Tecnologia”, subdividida em tipo de reciclagem: química (pirólise, despolimerização, carbonização, alcoólise, despolimerização glicolítica, hidrólise e glicólise) ou mecânica (com adição de calor, ou seja, processos que envolvem a etapa de fusão, como extrusão, injeção, rotomoldagem, prensagem e entre outros e sem adição de calor, ou seja, processos com adição de outros materiais pela técnica de mistura). A Figura 10 mostra a representação das taxonomias selecionadas para analisar o tipo de tecnologia presente nos artigos e patentes.

Figura 10 - Subdivisões da taxonomia final adotada no roadmap: Tecnologia

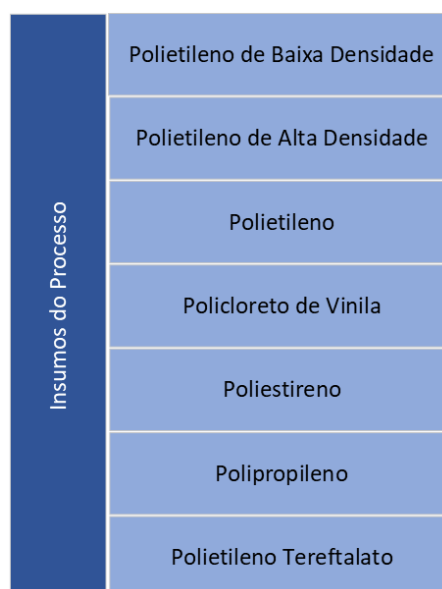


Fonte: A Autora, 2022

De forma a analisar a utilização das tecnologias em misturas contendo PET, foram reunidos os insumos do processo, divididos em “puro” (contendo apenas PET) e “misturas” (contendo PEBD, PEAD, PE, PVC, PS e PP). A Figura 11 apresenta a representação das taxonomias utilizadas para analisar o insumo utilizado no processo descrito pelos artigos e patentes.

Figura 11 - Subdivisões da taxonomia final adotada no roadmap: Insumos do

Processo



Fonte: A Autora, 2022

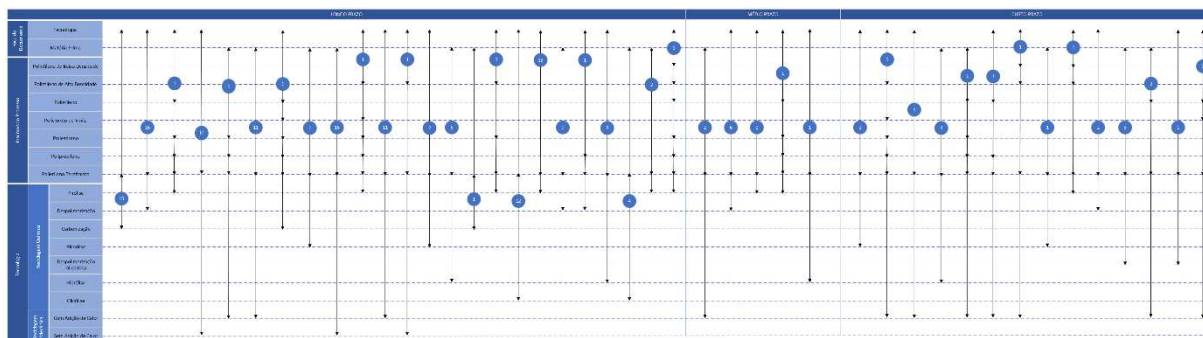
3.5 Análise dos dados

Após a coleta dos dados iniciais, do detalhamento e compilação das informações mais relevantes e da formação do conhecimento sobre o assunto, obtém-se o resultado por meio do *roadmap*. Conforme pode ser visto na Figura 12, o mapa finalizado é muito extenso, portanto, com o objetivo de facilitar a compressão, será mostrado em cortes temporais (verticais) com as taxonomias repetidas em cada corte para facilitar a sua leitura.

A análise do mapa será feita ao longo do Eixo Horizontal, ou seja, serão consideradas as taxonomias, previamente apresentadas, e o seu comportamento ao longo do tempo. Desta forma, será possível constatar alterações nas diversas tecnologias de reciclagem do Politereftalato de Etileno como, por exemplo,

composição da matéria-prima mais favorável para o produto desejado e tipo de reciclagem.

Figura 12 - Visualização completa do *technology roadmap*



Fonte: A Autora, 2022

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atendendo ao objetivo específico de realizar um levantamento bibliográfico em artigos e patentes sobre o reprocessamento do PET descartado, de acordo com a metodologia, apresentada previamente, utilizada para a realização do presente estudo, após a etapa de reunião de dados gerais e criação de uma base sólida de conhecimento sobre o tema, foi executada uma busca mais restrita, com uso de palavras-chave, para a seleção dos documentos relevantes.

Neste capítulo são descritos os resultados da prospecção adotada, explicando em detalhe os resultados obtidos para cada tipo de documento (artigos e patentes), separados em análises Macro, Meso e Micro.

4.1 Prospecção tecnológica – artigos científicos

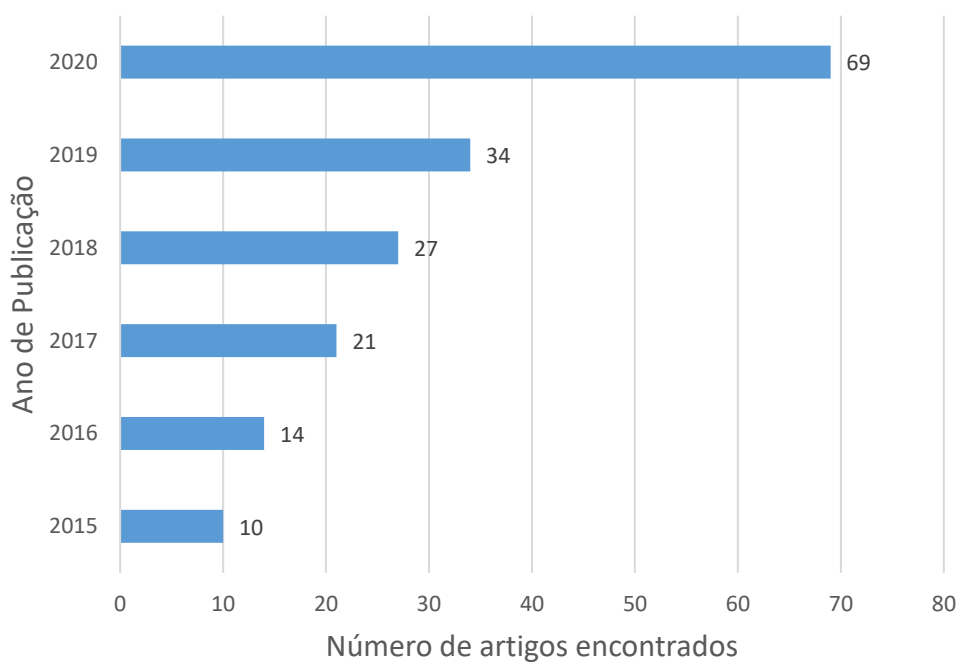
Os termos TITLE-ABS ("waste Polyethylene terephthalate" OU "waste PET" OU "recycle Polyethylene terephthalate" OU "recycle PET") foi utilizado na pesquisa e resultou em 1.236 documentos. Aplicou-se um filtro para direcionar a pesquisa para o período entre 2015 e 2021, visando analisar as tendências mais atuais, causando uma redução para 304 documentos. Para o *roadmap* elaborado neste trabalho foram selecionados os artigos cuja matéria-prima consistia no PET exausto – sozinho ou misturado com outros polímeros – o que resultou em 175 artigos que foram analisados e esmiuçados em planilha de Excel (Anexo 01)

O objetivo principal desta fase é identificar o tipo de processo mais recorrente e auxiliar a próxima etapa de prospecção. Nas subseções abaixo tem-se a análise de informações como: país de origem, cronologia de publicação, instituições responsáveis pela elaboração (universidade, centro de pesquisa ou empresa), tipo de processo com base nas definições de reciclagem, apresentadas previamente neste trabalho, matéria-prima e produto obtido.

4.1.1 Análise macro

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos quanto ao ano de publicação dos artigos, seu país de origem e as instituições responsáveis pela sua elaboração (universidade, centro de pesquisa ou empresa). A Figura 13 mostra a quantidade de artigos publicados ao longo dos anos. É possível observar o aumento no número de artigos publicados na temática de reprocessamento de PET, o que sugere um crescimento na relevância deste tema com o passar dos anos.

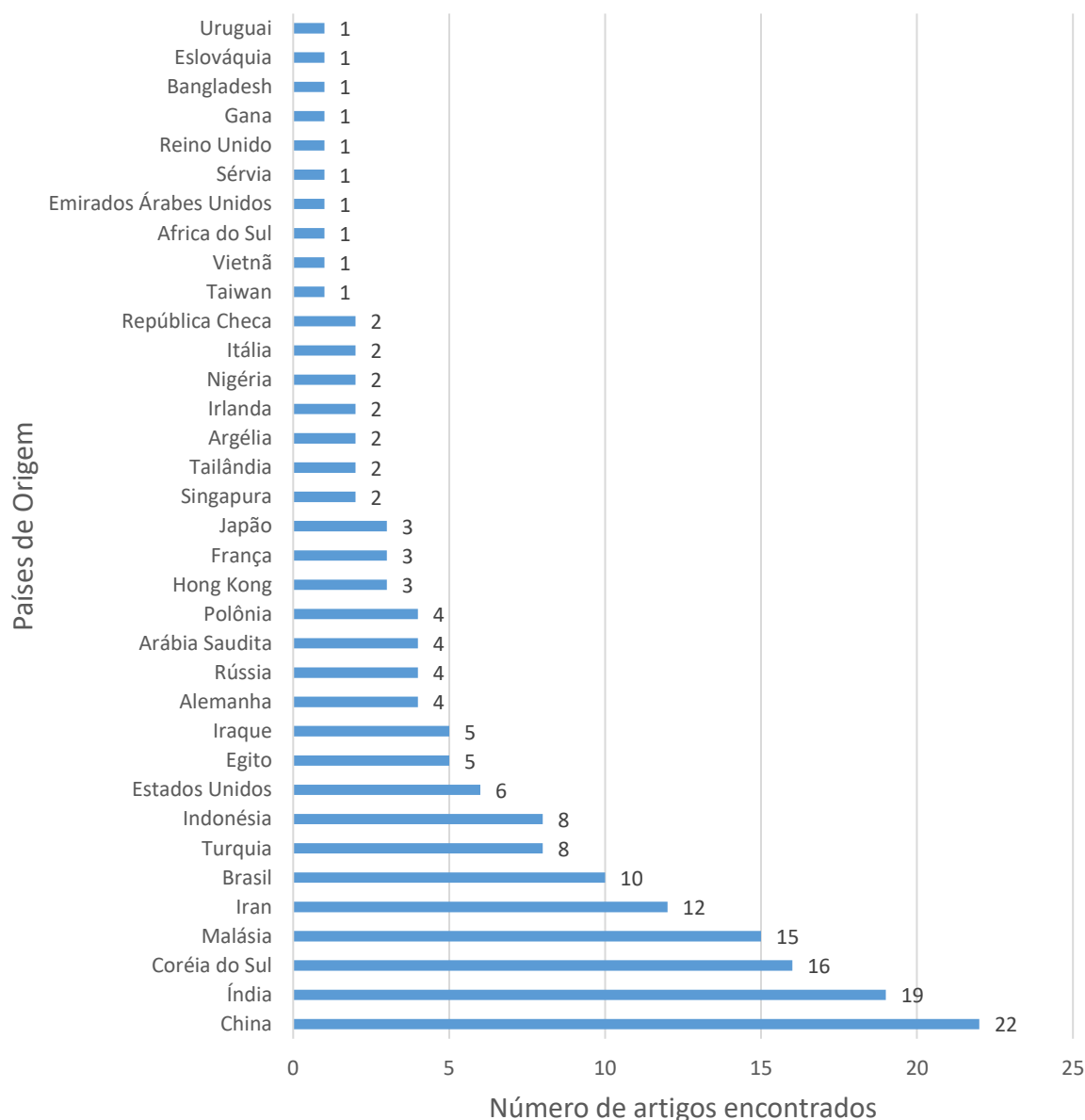
Figura 13 - Artigos científicos publicados sobre PET exausto no período de 2015 até 2020



Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

A Figura 14 mostra a quantidade de artigos, cuja matéria-prima é o PET reciclado e/ou virgem, publicados por cada país no período de 2015 até 2020.

Figura 14 - Artigos científicos encontrados separados pelos países de origem



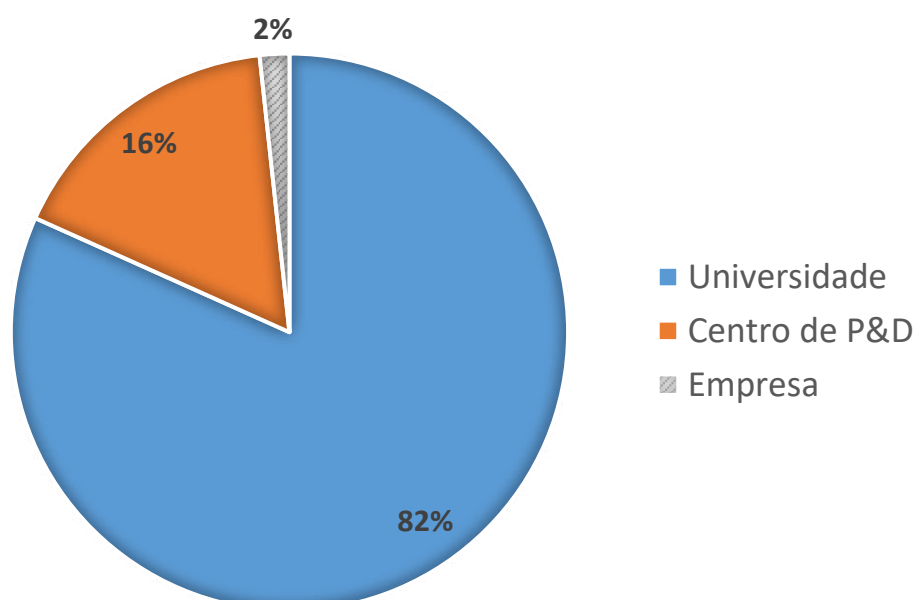
Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Em relação à distribuição de artigos por país de origem, tem-se a presença de 35 países, em destaque a China e a Índia, ultrapassando países como Estados Unidos. Uma possível justificativa é a quantidade de resíduos gerados - só em 2019 o país produziu 13 milhões de toneladas (Ritchie; Roser, 2018) - e o seu posicionamento contra os plásticos e a poluição gerada. Observa-se a presença do Brasil como o 6º país com mais publicações sobre o reprocessamento do PET, isso

pode ser motivado pela sua dependência econômica na produção de plásticos para consumo interno e exportação. (ABIPLAST, 2020) O Brasil se destaca na reciclagem do PET, superando os Estados Unidos, bem como vários países da União Europeia e Ásia. Essa conquista representa um exemplo notável de economia circular, refletindo uma atividade que abrange os três pilares da sustentabilidade: econômico, social e ambiental. Em 2021, o índice de reciclagem de embalagens de PET descartadas pela população brasileira atingiu a marca de 56,4%, revelando um crescimento de 15,4% em relação ao volume registrado em 2019. Esse resultado positivo demonstra o compromisso do país com a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento de práticas sustentáveis.

A Figura 15 mostra a quantidade de artigos publicados por Instituição de origem nos últimos cinco anos.

Figura 15 - Artigos científicos encontrados separados pela Instituição de Origem



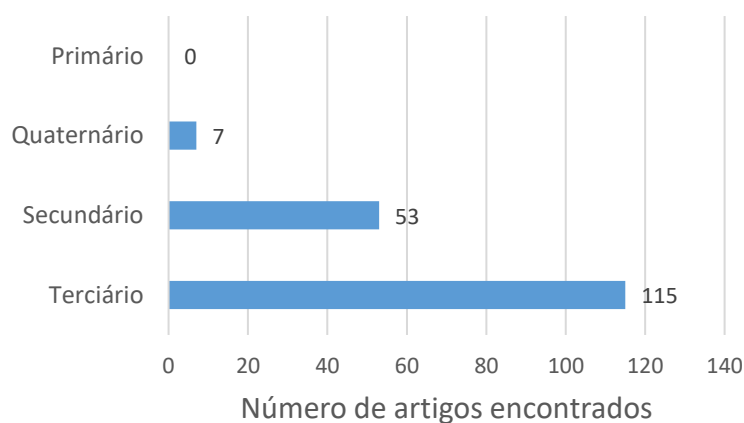
Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Das cento e setenta e cinco Instituições que publicaram artigos dentro do escopo previsto neste trabalho, tem-se 143 Universidades, 29 Institutos de Pesquisas e 03 Empresas. Isso pode ser devido ao fato de Institutos de Pesquisas e Empresas investirem na elaboração e deposição de patentes por ser economicamente mais vantajoso do que a publicação de artigos. (WIPO, 2022)

4.1.2 Análise meso

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos quanto ao tipo de reciclagem usada no tratamento do material exausto e o seu ano de publicação. Baseado nos resultados observados, optou-se por categorizar as tecnologias descritas nos documentos encontrados usando as definições existentes para os diversos tipos de reciclagem. A Figura 16 apresenta o percentual de artigos publicados por tipo de reciclagem.

Figura 16 - Artigos científicos encontrados separados pelo tipo de reciclagem

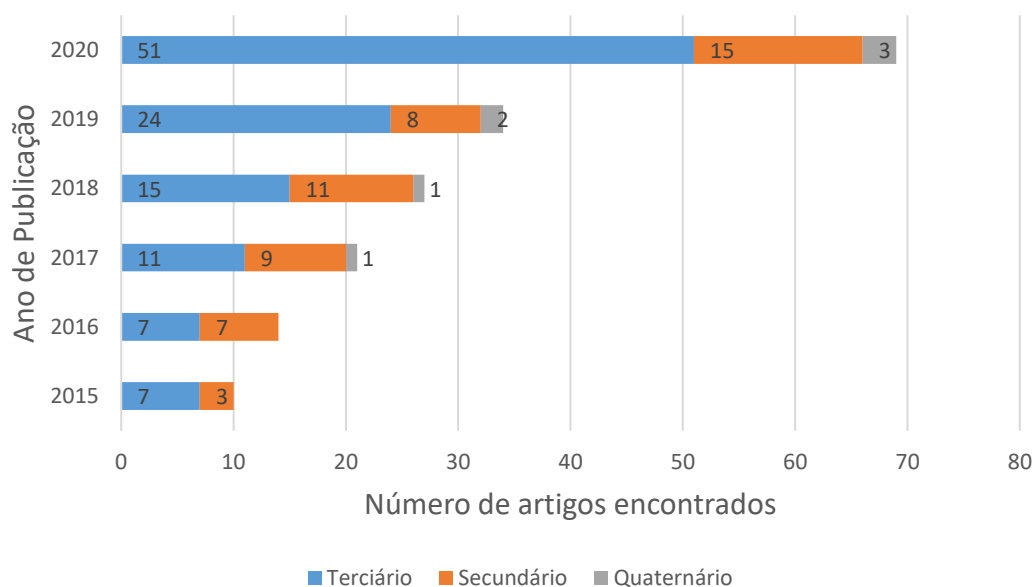


Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Observa-se a predominância da reciclagem terciária, ou química, para o reprocesso do PET. Uma explicação plausível para isto se deve ao fato de a reciclagem química promover a geração de produtos de maior valor agregado do que as demais. (Lee; Tschoepe; Voss, 2021; Solis; Silveira, 2020) Observa-se ainda, para o escopo definido neste trabalho, a ausência da reciclagem primária, que é um tipo atividade feita com os materiais termoplásticos provenientes de resíduos industriais sendo estes utilizado no mesmo processo.

Foi realizada uma análise ao longo dos anos quanto ao tipo de reciclagem estudada para o reprocessamento do PET com o objetivo de identificar tendências futuras e possíveis investimentos para centros de pesquisa e empresas, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Artigos científicos encontrados separados pelo tipo de reciclagem e pelo ano de publicação



Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Conforme pode-se constatar através da Figura 17, a reciclagem terciária vem ganhando maior destaque nas pesquisas científicas nos últimos anos. Isso se deve ao fato deste tipo de reciclagem, conforme foi dito anteriormente, proporcionar a geração de produtos de maior valor agregado. (Lee; Tschoepe; Voss, 2021; Solis; Silveira, 2020)

Um paralelo entre a Figura 13 e a Figura 17 mostra o aumento, ao longo dos anos, no número de artigos. Ao observar a Figura 17, constata-se que as publicações referentes à reciclagem terciária tiveram um aumento significativo, duplicando o número de artigos publicados entre os anos de 2019 e 2020, tal fato se explica pois, na reciclagem terciária, ocorre a conversão da matéria-prima em outras moléculas, o que acarreta em mudança de propriedades físicas e químicas e, conseqüentemente, na geração de uma gama maior de produtos. Já na reciclagem secundária, não há reação, somente reprocesso, fazendo com que suas tecnologias não sejam economicamente tão atrativas quanto as provenientes da reciclagem terciária.

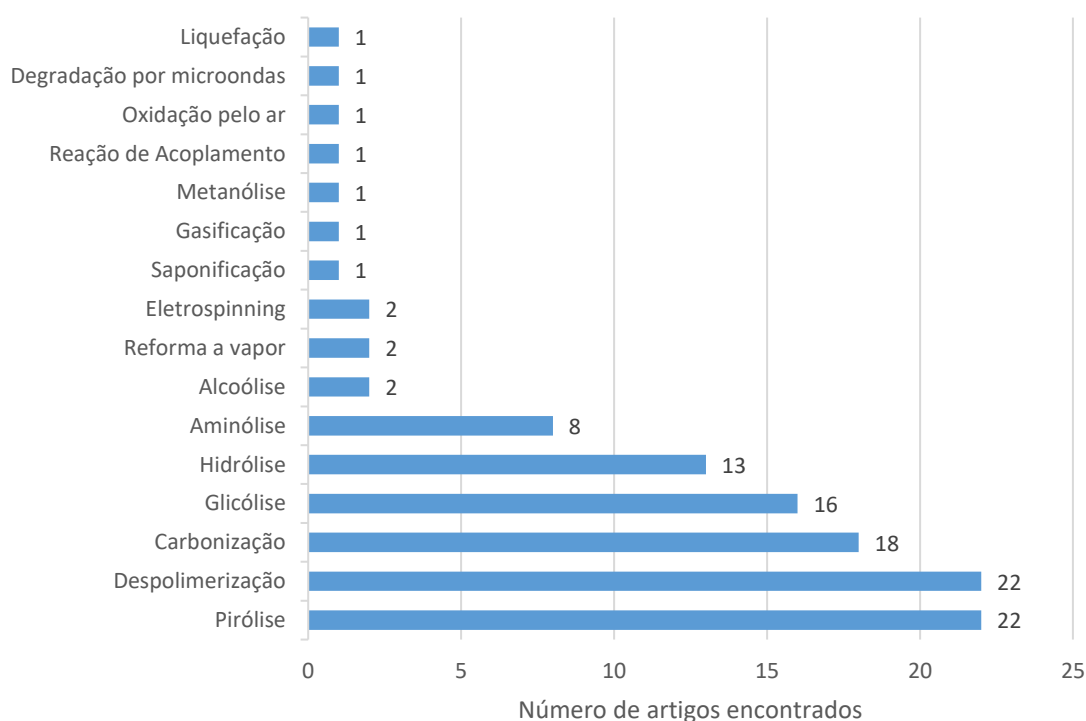
4.1.3 Análise micro

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos quanto ao tipo de tecnologia, a matéria-prima utilizada e o produto gerado. Optou-se por separar os documentos selecionados em dois tipos de tecnologias, oriundos de reciclagem terciária e de reciclagem mecânica (secundária). Essa abordagem tem o objetivo de

verificar as tendências na área acadêmica e orientar a estratégia de busca de patentes. A

Figura 18 indica os principais tipos de tecnologias abordados nos últimos anos.

Figura 18 - Artigos científicos encontrados separados pelo tipo de reciclagem terciária ou química



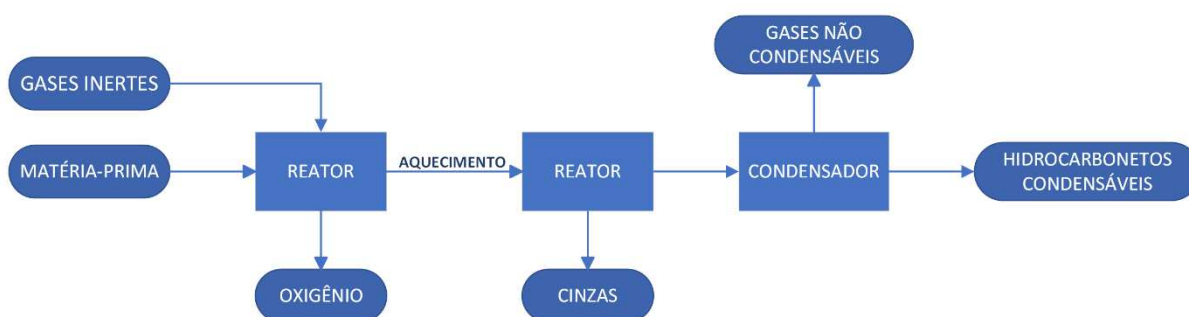
Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Observa-se a predominância de seis tecnologias, dentro da reciclagem química, para transformação do PET pós-consumo, são elas: Pirólise, Despolimerização, Carbonização, Glicólise, Hidrólise e Aminólise. Essas tecnologias se destacam devido à gama de produtos gerados durante o processo - a geração de hidrocarbonetos menores de diferentes números de carbono garante uma variedade maior de combinações para formação de produtos distintos de acordo com as

condições utilizadas - e ao maior valor agregado atrelado a estes produtos. (Lee; Tschoepe; Voss, 2021; Solis; Silveira, 2020)

A pirólise, representada pelo fluxograma presente na Figura 19, é a degradação pelo calor em ambiente inerte - livre de oxigênio - e resulta na produção de cinzas, hidrocarbonetos condensáveis e gases não condensáveis. (Sikdar; Siddaiah; Menezes, 2020)

Figura 19 - Fluxograma Pirólise



Fonte: A Autora, 2022

O processo de pirólise foi estudado, dentro do escopo desta tese, por vinte e dois autores. Bajad et al (2017) e Singh *et al.* (2019) estudaram a interação dos vários tipos de plástico com foco na produção de nanotubos de carbono para determinar a melhor maneira de implantação desta tecnologia. Já Singh *et al.* (2022) e Chattopadhyay *et al.* (2016) embora tenham utilizado diferentes tipos de plástico em conjunto com o PET, possuíam como foco a obtenção de combustíveis e matérias-primas para novos processos.

Doğan-Sağlamtimur *et al.* (2019) estudaram a produção de estruturas de carbono, com ênfase em negro de fumo, em baixas temperaturas (até 600°C). Todavia, Rai; Singh (2018), Wenlong *et al.* (2019), Ko *et al.* (2020) e Kim *et al.* (2020) avaliaram o efeito de altas temperaturas (de 750°C até 2400°C) na produção

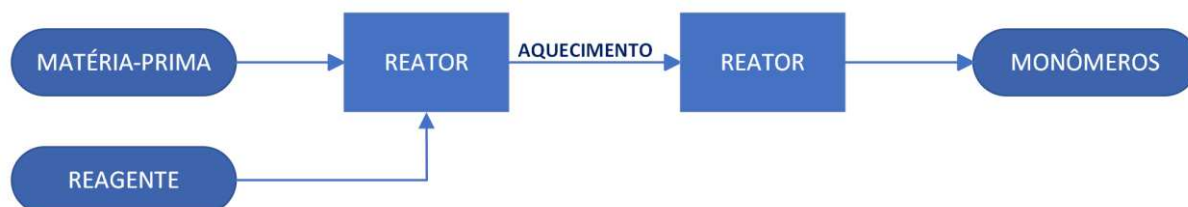
de estruturas de carbono como, por exemplo, grafite sintético, anodo carbônico, carbono ativado e carbono nanoporoso.

A utilização de plásticos para a geração de combustíveis tem ganhado destaque nos últimos anos. Nabgan *et al.* (2020) realiza pirólise a baixa temperatura, em torno de 90°C, para geração de benzeno, tolueno, metilindeno, estireno, hexano, ácido acético, metilnaftaleno, éster fenílico, bifenileno, ácido benzóico, naftaleno, vinilfurano, azuleno, bifenilo, acetofenona, naftaleno, metilnaftaleno, etenilnaftaleno e metanona. Lee *et al.* (2017) realizam pirólise a alta temperatura, em torno de 900°C, para geração de hidrogênio e metano. Mishra; Sahoo; Mohanty (2019) realizam pirólise em temperaturas variadas, de 100°C até 900°C, para geração de combustível de melhor qualidade e em maior quantidade de forma mais eficiente e sustentável. Olam; Karaca, (2019) realizam pirólise em baixa temperatura, em torno de 400°C, para geração de hexano e tolueno. Commeh *et al.* (2020) estudaram a pirólise em alta temperatura, em torno de 600°C, para geração de 1-Tetradeceno, 1-Pentadeceno, Ceteno, Hexadecano, 1-Heptadeceno, Heptadecano, Octadecano, Nonadecano, Eicosano, Tetratetracontano, 1-Undeceno, 1-Deceno. Por fim, Osman *et al.* (2020) analisaram o processo de pirólise em baixa temperatura, em torno de 200°C, para geração de hidrocarbonetos.

Kim; Park; Lee (2020) e Park *et al.* (2020) estudam a utilização de catalisadores no processo de pirólise com o objetivo de evitar a geração de compostos aromáticos policíclicos para torná-los mais ecológicos e mais sustentáveis para o descarte de PET. Outra vertente de estudos foi com relação aos equipamentos utilizados para realização do processo de pirólise, Niksiar; Faramarzi; Sohrabi, (2015), Rajendran *et al.*, (2020) e Pótrolniczak *et al.*, (2020) focaram no uso de fornos e reator de leito.

A despolimerização, representada pelo fluxograma presente na Figura 20, é a degradação de macromoléculas em moléculas menores de mesma forma molecular.

Figura 20 - Fluxograma Despolimerização



Fonte: A Autora, 2022

O processo de despolimerização foi estudado, dentro do escopo desta tese, por vinte e dois autores. Kusumocahyo *et al.* (2020) e Arahman *et al.* (2017) estudam a despolimerização em baixas temperaturas, em torno de 100°C, do PET, sem adição de outros plásticos, para produção de membranas. Buasri *et al.* (2018), Al-Enizi *et al.* (2020), Alhokbany *et al.* (2020) e Ubaidullah *et al.* (2020) estudaram a produção de estruturas de carbono, com ênfase em grafeno e nanocompósitos, em baixas temperaturas (até 300°C).

A produção de ácido tereftálico (TPA) foi estudada por Kratish *et al.* (2020) a partir da despolimerização em altas temperaturas, em torno de 260°C, do PET, com adição de polipropileno. Já Hu; Wu; Zhu (2018) e Wang *et al.* (2019) realizaram o mesmo processo em baixas temperaturas, em torno de 120°C, e sem adição de outros tipos de plásticos.

A geração de materiais compósitos também foi analisada utilizando o processo de despolimerização. Marques *et al.* (2018, 2019) estudaram a produção de material de isolamento termoacústico resistente ao fogo, enquanto Selvaraj;

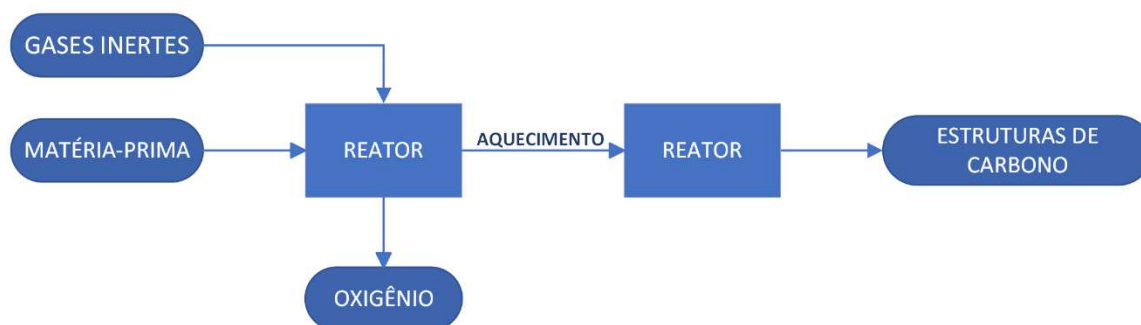
Raghavarshini; Alagar, (2020) detalham o processo para geração de compósitos mistos híbridos usando resina epóxi.

Outra aplicação para despolimerização do PET é a produção de materiais para captura de dióxido de carbono. Lagae-Capelle *et al.* (2020) dissertam sobre o processo de obtenção de polímeros de coordenação, Ren *et al.* (2016) analisaram a geração de estrutura metal-orgânica à base de cromo, Le *et al.* (2019) discorrem sobre as aplicações de aerogéis funcionalizados de PET e Le *et al.* (2020) discorrem sobre a geração de aerogéis de PET revestidos com metiltrimetoxissilano para aplicações de limpeza de derramamento de óleo.

Monsigny, Berthet e Cantat (2018), Ohmura *et al.* (2017), Panasyuk *et al.* (2015) e Thi le bui *et al.* (2016) estudaram a despolimerização do PET com o objetivo de produzir matéria-prima para outros processos. Enquanto Rakhmatullina *et al.* (2020) dissertam sobre a utilização desta tecnologia para produção de ligantes e Hronec; Fulajtárová (2019) analisam a produção de furfural visando a geração de energia.

O processo de carbonização, representado pelo fluxograma presente na Figura 21, é uma técnica que promove a conversão térmica de matérias-primas em combustíveis sólidos com alto teor de carbono.(Nizamuddin *et al.*, 2017).

Figura 21 - Fluxograma Carbonização



Fonte: A Autora, 2022

Wen *et al.* (2019) utilizam essa tecnologia para reciclar resíduos plásticos mistos - PE, PS, PVC e PET - com o objetivo de produzir nanofolhas de carbono porosas (PCNSs). Este trabalho apresenta uma abordagem sustentável para a produção em massa de PCNSs, candidatos ideais para supercapacitores.

Dentro do escopo desta tese, a Polônia é o país de origem de dois artigos. Liu *et al.* (2020) abordam a reciclagem de resíduos plásticos, através do processo de carbonização, com objetivo de produzir carbono poroso hierárquico. A sua combinação com grafeno permite sua aplicação para remediação ambiental, eletrocatalise, adsorventes e armazenamento de CO₂. Já Wen *et al.* (2020a) propõe uma abordagem para sintetizar PCNS para supercapacitores de uma maneira sustentável por meio da reciclagem de PET com o objetivo de atenuar os problemas ambientais relacionados aos resíduos de plástico.

A carbonização de resíduos plásticos é abordada por quatro artigos cujo país de origem é a Coreia do Sul. Em estudo elaborado por Yuan *et al.* (2020), garrafas plásticas de PET foram usadas para preparar carbonos porosos para capturar CO₂. Os testes realizados pelos autores revelam uma absorção consideravelmente alta, boa seletividade de CO₂ sobre N₂ e CO, fácil regeneração, excelente estabilidade cíclica e rápida adsorção de CO₂, requisitos importantes para aplicações práticas e industriais dos materiais gerados. Yuan *et al.* (2020b) utilizam resíduos de PET para desenvolver carbonos porosos para a captura de CF₄, um gás de efeito estufa com alto potencial de aquecimento global. Em trabalho elaborado por Yuan *et al.* (2020c), resíduos de PET foram valorizados em carbonos microporosos para desenvolver uma forma economicamente viável de descarte de resíduos plásticos e desenvolver adsorventes eficientes para captura de CO₂, simultaneamente. Seo *et al.* (2019) estudaram a adição de PET à reação de síntese do betume com o objetivo de

promover a reticulação da reação de síntese e para minimizar o colapso estrutural durante o processo de ativação. Os efeitos da presença de grupos funcionais de oxigênio foram investigados durante o processo de ativação para determinar o comportamento do PET durante a geração de carvão ativado.

Já a China é o país de origem de três artigos. Em estudo realizado por Wang *et al.* (2020) os resíduos de carbono ativado gerados a partir da carbonização do PET foram avaliados quanto a adsorção de CO₂ para fornecer uma investigação abrangente sobre os possíveis impactos ambientais do ciclo de vida e, assim, obter uma rota ambientalmente amigável para fechar o ciclo de carbono. A conversão de sal fundido de garrafas plásticas em carbono nanoestruturado altamente condutor é estudada por Kamali; Yang; Sun, (2019). Em artigo publicado verificou-se que o tratamento térmico dos resíduos plásticos no ar causa a formação de um carbono amorfo. O método abordado fornece uma maneira simples, econômica e eficiente de produzir materiais de carbono condutivos, além de ter um impacto ambiental positivo por meio da conversão de resíduos plásticos quase não degradáveis em materiais de alto valor. Wei; Kamali (2020) relatam uma estratégia de duas etapas para a conversão de resíduos de PET em partículas de carbono porosas nanoestruturadas com tamanhos externos de até dezenas de micrômetros, fornecendo propriedades únicas para aplicações de adsorção de corantes. Essa estratégia fornece uma técnica eficiente para preparar adsorventes altamente porosos para remover corantes tóxicos dos recursos hídricos.

O Egito é o país de origem de dois artigos. El Essawy *et al.* (2017) descrevem um processo econômico livre de solventes para conversão de resíduos de garrafas PET em materiais de nanoestrutura de carbono. Este método possui algumas vantagens sobre os demais relatados na literatura, entre eles, uma abordagem

ambientalmente amigável e a possibilidade de ampliação para produção industrial em escala. Já o trabalho produzido por Elessawy *et al.* (2019) apresenta uma etapa simples para a síntese verde, escalável industrialmente, do grafeno dopado com nitrogênio com arquitetura porosa 3D por meio da carbonização de garrafas PET. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que a arquitetura porosa 3D única permite o transporte fluente de íons através da estrutura promovendo alta condutividade elétrica.

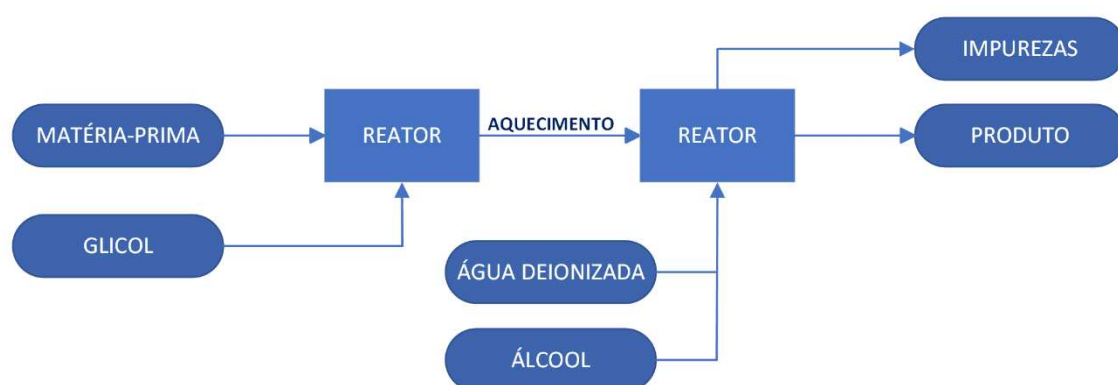
A conversão de garrafas de PET em materiais de estrutura metal-orgânico de alto valor é analisada por Al-Enizi *et al.* (2020b). Tais estruturas demonstram grande domínio sobre outros materiais devido à alta área superficial e porosidades excepcionais. Os autores relatam a utilização de uma abordagem química simples para produzir nanopartículas de metalóxido embebidas em carbono mesoporoso por meio da carbonização de estruturas metal-orgânicas derivadas de frascos de PET para aplicação em supercapacitores.

Senthil Raja *et al.* (2016) sintetizaram com sucesso uma série de estruturas metalorgânicas (MOFs) usando resíduos de garrafa PET através de condições solvotérmicas simples. Já o estudo elaborado por Djahed *et al.* (2016) apresenta um método novo e barato para a produção de carvão ativado usando resíduos de garrafas PET. Dentro do escopo de carbonização do PET, Kondrina *et al.* (2018) analisaram a síntese de diamante a partir de PET para produção de microdiamantes livres de impurezas metálicas e para reciclagem de garrafas plásticas sob prensagem sem formação de produtos tóxicos. Já Rahmawati *et al.* (2019) sintetizaram, com sucesso, carbono negro a partir de garrafas de plástico PET usando um método de aquecimento simples. O desenvolvimento de adsorventes de carbono com alto teor de oxigênio a partir de resíduos de PET por carbonização e

ativação em diferentes temperaturas (de 500 a 800 °C) foi estudado por Kaur *et al.* (2019).

Shirazimoghaddam *et al.* (2023) definem o processo de glicólise como a despolimerização da matéria prima utilizando como solvente o glicol. A Figura 22 apresenta o fluxograma deste processo.

Figura 22 - Fluxograma Glicólise



Fonte: A Autora, 2022

Esta tecnologia foi estudada, dentro do escopo desta tese, por dezesseis autores. A produção de bis(2-hidroxietil) tereftalato (BHET), por meio da glicólise do PET reciclado, foi discutida por Sun *et al.* (2018) com o objetivo de explorar tecnologias ambientalmente benignas e eficientes para solubilizar e reciclar plásticos de poliéster pós-consumo. Já Liu *et al.* (2018) teve como finalidade desenvolver uma estratégia de dissolução-degradação adicionando diferentes tipos de solventes como, por exemplo, anilina e nitrobenzeno no processo tradicional de glicólise de PET.

A otimização das condições de reação para a glicólise catalítica induzida por micro-ondas foi apresentada por Park; Sridhar; Park (2020) . Hu *et al.* (2020) analisaram os efeitos da quantidade de catalisador, da temperatura e do tempo de

reação no processo de glicólise para obter um maior rendimento na produção de BHET. Já Hermanová *et al.* (2015) dissertam sobre a produção de BHET, por meio do processo glicolítico, para avaliar a sua biodegradação sob condições termofílicas em lodo digerido.

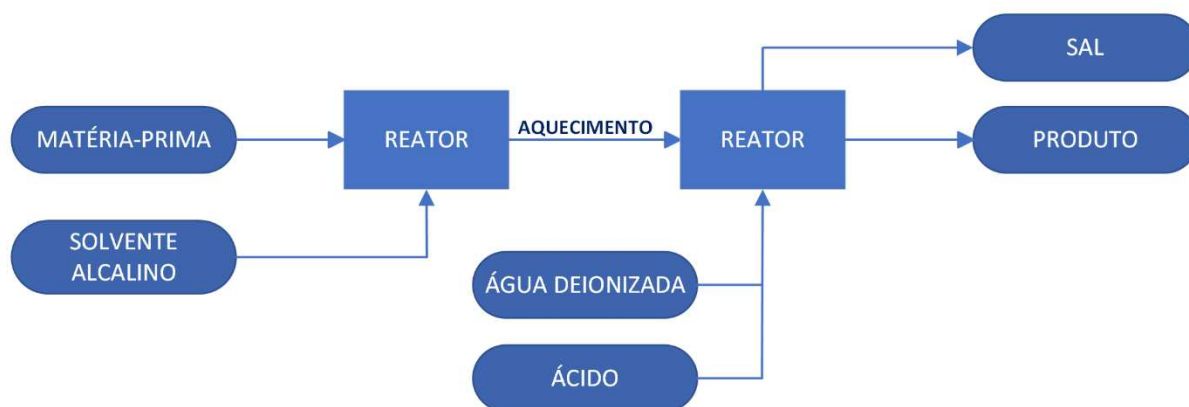
O efeito da temperatura na geração de estruturas de carbono pode ser visto nos trabalhos de Zhou *et al.* (2020), que obteve nanomaterial de carbono fibroso através da glicólise do PET em 50°C, e de Fang; Yang (2018), que gerou nanotubos de carbono de paredes múltiplas utilizando o mesmo processo em alta temperatura, em torno de 400°C.

Foti; Lerna (2020) analisaram a glicólise do PET reciclado para aplicação como substituto da areia em argamassas, que podem ser utilizadas como isolamento térmico na área da construção. Já Bal *et al.* (2017), Büyükyonga *et al.* (2020), Çam; Bal; Güçlü (2015), Jovičić *et al.* (2018), Ma *et al.* (2020) e Yun *et al.* (2020) estudaram o processo para geração de resinas.

A produção de poliuretanos à base de água foi discutida por Zhou *et al.* (2017), em seu estudo o PET reciclado foi empregado como matéria prima e o efeito da adição de oligoésteres glicolisados nas propriedades finais do produto foram mapeados. Já Bhattacharyya *et al.* (2017) têm como foco principal de pesquisa a síntese de poliuretano, com objetivo de melhorar o veículo de entrega de insulina oral com incorporação de polímeros naturais como alginato e quitosana, através do BHET gerado a partir da glicólise do PET.

Katyal; Morrison (2007) definem hidrólise como a decomposição química de substâncias pela água. A Figura 23 apresenta o fluxograma deste processo.

Figura 23 - Fluxograma Hidrólise



Fonte: A Autora, 2022

Esta tecnologia foi estudada, dentro do escopo desta tese, por treze autores. O aumento da taxa de reciclagem do PET é uma meta relevante para promover a sustentabilidade ambiental, sendo desejável a reciclagem do material em produtos de maior valor agregado. Em estudo feito por Kim *et al.* (2019), avaliou-se a viabilidade da valorização biológica do PET por meio do processo de *upcycling*, especificamente através da conversão biológica do TPA, monômero resultante da hidrólise química do PET, com o intuito de obter compostos aromáticos e seus derivados. Ao longo da investigação, foram obtidos cinco diferentes compostos aromáticos e seus respectivos derivados, demonstrando o potencial promissor dessa abordagem para aprimorar a reciclagem do PET e contribuir para a economia circular.

A produção de TPA também foi realizada por Kulyukhin; Gordeev; Seliverstov (2020), com o objetivo de estudar a possibilidade de usar o tratamento em fase gasosa de resíduos de PET em uma atmosfera de nitratação para fins de reciclagem. Enquanto Sun *et al.* (2018a) exploram um novo método de hidrólise alcalina de álcool para geração de TPA utilizando garrafas plásticas de PET como matéria-prima. Dentro desta temática, Mohsin *et al.* (2018) estudaram a produção de TPA por meio da hidrólise *in situ* com metóxido de sódio em metanol e dimetil sulfóxido

(DMSO) como solvente sob irradiação de micro-ondas. Já a geração de uma estrutura orgânica de metal lantanídeo baseada no ligante do TPA, obtido pela hidrólise do PET, foi estudada e sintetizada por Zhang *et al.* (2019).

Jung; Kim; Choi (2020) dissertam sobre a síntese de compósito de carbono poroso magnético derivado de estrutura metal-orgânica usando TPA gerado a partir da hidrólise alcalina, em condições suaves, de garrafas de resíduos PET. O principal objetivo deste estudo foi avaliar o seu potencial como adsorvente para o antibiótico cloridrato de tetraciclina e, considerando a capacidade de reutilização e separabilidade magnética apresentada, o compósito mostrou imenso potencial para aplicação sugerida pelos autores.

A hidrólise catalisada por enzimas tem sido reconhecida como uma alternativa promissora, Carniel *et al.* (2017) realizaram uma triagem de 10 enzimas comerciais usando BHET como substrato modelo e chegaram à conclusão de que *Candida antarctica* lipase B e *Humicola insolens* cutinase são potenciais biocatalisadores. As limitações desta técnica foram estudadas por Castro *et al.* (2019) com foco na hidrólise variada de PET catalisada por *Humicola insolens* cutinase.

Kawai; Kawabata; Oda (2020) discorrem sobre o estado atual das PET hidrolases e o potencial de sua aplicação. Diferentemente do PET amorfo, a completa compreensão da hidrólise enzimática do PET cristalino, especialmente de garrafas PET, permanece como um desafio a ser superado. Já *review* elaborado por Carr; Clarke; Dobson (2020) discorre os conhecimentos atuais acerca do processamento enzimático do PET, juntamente com as estratégias propostas para sua otimização e aplicação, visando esclarecer as próximas etapas no combate à poluição causada pelo PET e outros tipos de plásticos.

Al-Sabagh *et al.* (2016) revisam as diferentes rotas de reciclagem do PET, entre elas a hidrólise, e apresenta o impacto dos novos catalisadores recicláveis, como os líquidos iônicos, nos futuros desenvolvimentos da reciclagem química do PET. Enquanto Barth *et al.* (2015) identificaram os gargalos presentes para realização da degradação enzimática completa de materiais PET com o objetivo de otimizar o processo biocatalítico de reciclagem. Já a revisão publicada por Maurya; Bhattacharya; Khare (2020) abrange uma visão geral do uso de enzimas para o gerenciamento de resíduos de PET e as restrições decorrentes dos métodos estudados, em específico a hidrólise, são sistematicamente destacados na revisão.

Chinigo *et al.* (2022) definem a aminólise como qualquer reação química na qual uma molécula é dividida em duas partes por reação com uma molécula de amônia ou uma amina. A Figura 24 apresenta o fluxograma deste processo.



Fonte: A Autora, 2022

Esta tecnologia foi estudada, dentro do escopo desta tese, por oito autores. Leng; Padhan; Sreeram (2018) investigam a viabilidade do uso de BHETA, aditivo residuais de PET, obtido pelo processo de aminólise para melhorar a estabilidade de armazenamento e o desempenho reológico do asfalto modificado com borracha triturado. Já Padhan *et al.* (2020) confirmam a possibilidade de usar o BHETA como um modificador ambientalmente correto para misturas betuminosas. Enquanto

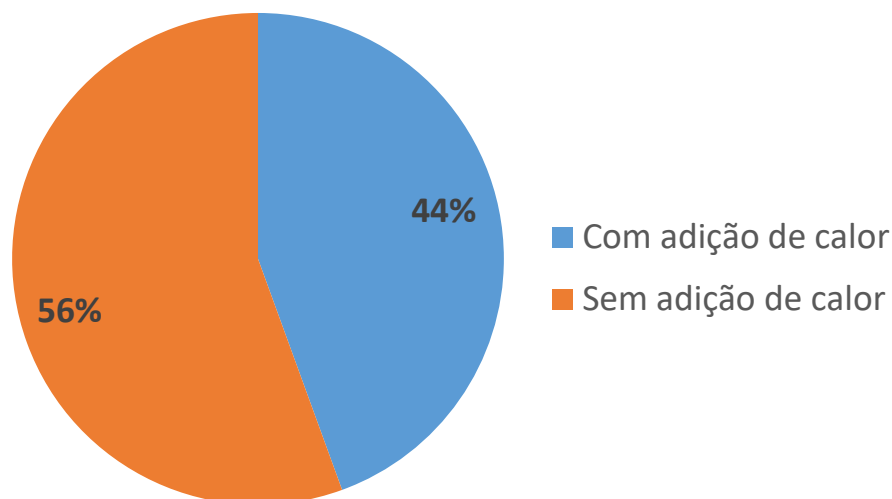
Musale; Shukla (2016) analisam a utilização de solvente eutético profundo como catalisador eficaz na produção de BHET por meio da aminólise de garrafas PET.

Devido à baixa solubilidade dos polímeros, estabilidade em altas temperaturas, severas condições de fabricação e alto custo do polímero, o uso de polímeros para modificação de betume é muito restrito. Para superar essas dificuldades, Padhan; Gupta (2018) demonstraram uma nova abordagem onde a polimerização in situ de BHETA - que é sintetizado a partir da reação de aminólise de resíduos de PET - com difenilmetanodiisocianato (MDI) no corpo de betume para o desenvolvimento de poliuretano à base de polímero modificado betume.

O trabalho produzido por Meawad; Ibrahim (2019) tem como objetivo desenvolver um novo agente dispersante bifuncional de baixo custo e ecologicamente correto, por meio da aminólise de resíduos de PET. Uma modificação química é realizada para produzir um produto de valor agregado, o tereftalato de polietileno modificado, que pode ser usado como agente dispersante de cimento e é capaz de atuar como redutor de água.

Quanto aos cinquenta e quatro artigos, onde o reprocessamento do PET é feito via reciclagem mecânica, analisou-se a necessidade de calor para execução do procedimento descrito no artigo científico. A Figura 25 mostra que as tecnologias aplicadas ao PET mais estudadas foram o reprocessamento sem adição de calor, ou seja, o PET exausto é inserido em material cerâmico.

Figura 25 - Artigos científicos encontrados separados pelo tipo de reciclagem mecânica



Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Quanto aos produtos gerados através do reprocessamento com adição de calor, Ameri e Nasr (2017), Ashoor; Kareem e Al-Baiati (2019), Baghaee Moghaddam *et al.* (2015), Choudhary; Kumar e Murkute (2018), El-Naga e Ragab (2019), Taherkhani e Arshadi (2019), Usman *et al.* (2016) e Ziari; Kaliji e Babagoli (2016) relatam sobre a produção de asfalto, já Çinar; Kar (2018); Farrapo *et al.* (2017) e Liu *et al.* (2017b) estudaram a geração de compósitos enquanto Ahmed *et al.* (2020), Hongsrphan *et al.* (2018) e Luiz *et al.* (2020) discorrem sobre a produção de misturas plásticas.

A geração de calçamento foi estudada por Al-Haydari e Al-Haidari (2020), Ameli *et al.* (2020), Islam; Meherier e Islam (2016) e Ahmad *et al.* (2019), já a produção de misturas de PET puro com resíduos de PET foi analisada por Curtzwiler *et al.* (2017) e Silva Freitas *et al.* (2020). Alighiri *et al.* (2019) relatam a formação de tijolo e Bamigboye *et al.* (2019) discorrem sobre a produção de telhas. O

reprocessamento de embalagens plásticas foi estudado por Singh; Kumari e Kundu (2017) com o objetivo de gerar embalagens dentro dos padrões de qualidade exigidos para armazenagem de alimentos. A formação de folhas laminadas foi apresentada por Khoiri *et al.* (2020).

Quanto aos produtos gerados a partir do reprocessamento sem adição de calor, Baghaee Moghaddam; Soltani e Karim (2015), Esfandabad *et al.* (2020), Fernández *et al.* (2017), Khan *et al.* (2019), Syammaun; Meillyta e Yati (2020) e Tjaronge *et al.* (2020) relatam sobre a produção de asfalto enquanto Ali *et al.* (2020), Azhdarpour; Nikoudel e Taheri (2016), Halim; Taib e Aziz (2020), Krasna; Noor e Ramadani (2019), Mohammed; Al-Hadithi e Mohammed (2019), Nikbin *et al.* (2020), Nikbin e Ahmadi (2020), Rahimi R. *et al.* (2016), Sadrmomtazi *et al.* (2016), Shahidan (2018) e Usman *et al.* (2018) discorrem sobre a geração de calçamento.

A produção de tijolo é analisada por Azmi *et al.* (2018), Khalid *et al.* (2018) e Manisha e Singh (2017), já Isique; da Silva e Matsumoto (2017), Kazi Tani *et al.* (2018) e Wei *et al.* (2018) estudam a geração de compósitos. A produção de combustíveis sólidos também foi analisada, Vieira *et al.* (2020) utilizaram resíduos de PET e PEAD para alcançar este resultado. Corinaldesi; Donnini e Nardinocchi (2015) dissertam sobre a geração de rebocos a partir de resíduos plásticos para construções sustentáveis e energeticamente eficientes.

A produção de fibras de PET a partir de resíduos plásticos foi estudada por Mishra e Kumar Gupta (2018), enquanto a geração de placas foi analisada por Klímek *et al.* (2016) e Ngadiman *et al.* (2018). Já SPÓSITO *et al.* (2020) dissertam sobre a produção de argamassa e Esi e Baykal (2020) abordam a produção de tecidos para estofados.

Os principais equipamentos utilizados nos processos termomecânicos são moinhos, estufas e extrusoras. Ressalta-se que as matérias-primas utilizadas nesses estudos sofrem pré-tratamento de forma a eliminar impurezas como resíduos oleosos que podem contaminar o produto final e consequentemente afetar as propriedades desejadas. Dentre os artigos que explicitavam o método de resfriamento para aquisição do produto, todos usavam água corrente.

Quanto aos sete artigos, onde o reprocessamento do PET é feito via reciclagem quaternária, observa-se a presença da degradação biológica. Hidrolases microbianas para degradação de poliésteres têm mostrado seu potencial na despolimerização biocatalítica de PET. Embora o seu desempenho requeira melhorias substanciais para garantir uma degradação eficiente de resíduos PET pós-consumo em um processo industrial. Wei; Zimmermann (2017) discursam sobre o desenvolvimento de novas hidrolases com propriedades catalíticas específicas para materiais PET altamente cristalinos e de grau de garrafa aplicando metodologias de biotecnologia microbiana para identificar novas enzimas do ambiente. Se forem bem-sucedidas, essas enzimas podem dar uma contribuição importante para uma futura indústria sustentável de reciclagem de plástico em circuito fechado.

Koshti; Mehta; Samarth (2018) discutem uma visão geral dos vários métodos de descarte de plástico existentes, juntamente com suas limitações e mecanismo de biodegradação do PET e fatores que afetam a biodegradação. Este *review* sugere que técnicas como modificação enzimática e remodelação genética podem ser abordadas para resultados mais rápidos e melhores uma vez que muitas espécies bacterianas e fúngicas sabidamente perturbam este resistente polímero aromático.

Zimmermann (2020) defende que a conversão de resíduos plásticos para recuperar seus constituintes e reciclá-los em novos produtos é uma estratégia viável para economizar recursos valiosos e evitar a contaminação do meio ambiente. Uma alternativa ambientalmente benigna à reciclagem convencional, com o objetivo de descartar o modelo de uso único do plástico em favor de uma economia circular, abordada pelo *paper* é a reciclagem biocatalítica do PET.

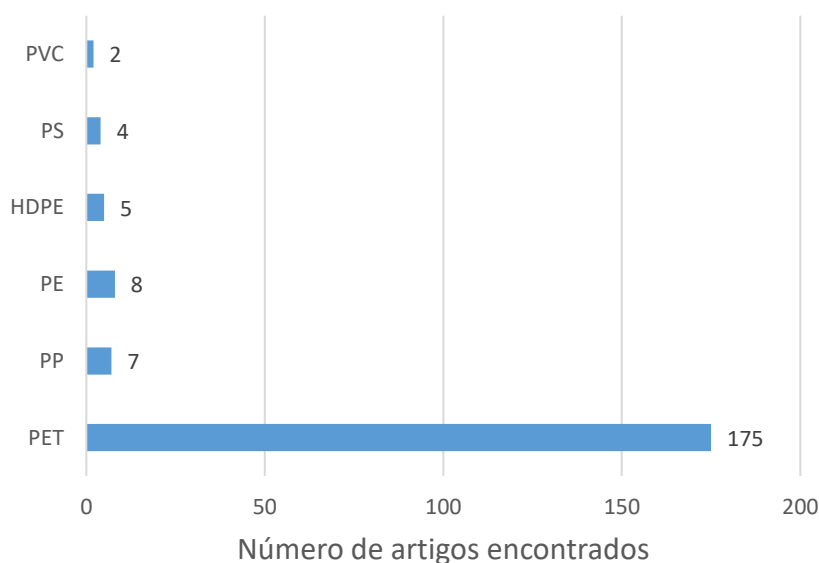
Kim *et al.* (2020a) demonstram a expressão funcional da PETase em uma microalga verde modelo, *C. reinhardtii*. Sua atividade catalítica foi comprovada pela detecção de TPA por meio de análise de HPLC. Além disso, alterações morfológicas na superfície do filme de PET após o tratamento com PETase foram observadas por microscopia eletrônica. De acordo com os autores, esses resultados sugerem que as microalgas são uma estratégia de tratamento biológico para a poluição plástica, especialmente em ambientes de água doce e terrestres. Já a biodegradação e a conversão do PET são discutidas, dentro do escopo da economia circular, por Hiraga *et al.* (2019) com ênfase na aplicabilidade da biorremediação, da bioconversão e de biotratamentos.

Uma solução promissora e ecológica para a decomposição biológica de resíduos de PET em um ambiente de água salgada usando uma microalga eucariótica em vez de uma bactéria como sistema modelo é discutida por Moog *et al.* (2019). Os resultados obtidos pelos autores demonstram o potencial do sistema de diatomáceas para futuras aplicações biotecnológicas na degradação biológica de PET, especialmente para abordagens de biorremediação de água do mar poluída por PET. Já Samak *et al.* (2020) discutem o progresso recente nas abordagens de bioengenharia enzimática usadas para descobrir novos biocatalisadores de PET e elucidam o mecanismo de degradação com o objetivo de melhorar o desempenho

catalítico, solubilidade e produtividade e, também, de avaliar criticamente sua força e fraqueza. As estratégias de bioengenharia relatadas neste *review* podem ser usadas para reduzir a cristalinidade do PET e aumentar a temperatura operacional das enzimas hidrolisantes.

Vale ressaltar que alguns estudos também abordaram outros polímeros em conjunto com PET, conforme mostra a Figura 26. É importante ressaltar que todos os artigos possuem o PET como matéria-prima principal e, portanto, esta análise tem como objetivo verificar a aplicação das tecnologias de reprocessamento para o caso de misturas, situação muito comum no descarte de resíduos plásticos.

Figura 26 - Matérias-primas utilizadas nos artigos encontrados



Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de artigos, 2022

Observa-se que o PP e o PE são os polímeros mais presentes junto ao PET pós-consumo nos artigos analisados. De acordo com pesquisa realizada pela ABIPLAST (2020), 20% e 33% de todas as resinas plásticas consumidas no Brasil

são, respectivamente, PP e PE, o que está em acordo com o cenário apresentado pela Figura 26, considerando que o mercado brasileiro segue a tendência mundial.

4.2 Prospecção tecnológica – patentes concedidas

O termo TITLE-ABS (("Polyethylene" OR "Polyethylene terephthalate" OR "Polyvinyl Chloride" OR "Polypropylene" OR "Polystyrene" OR "Low-Density Polyethylene" OR "Medium-Density Polyethylene" OR "High-Density Polyethylene" OR "Ultra High Molecular Weight Polyethylene") AND ("waste" OR "recycling")) foi utilizado na pesquisa para definir os tipos de plásticos e garantir a utilização de material pós-consumo. Juntamente, usou-se a Classificação Internacional de Patentes (IPC) - estabelecida pelo Acordo de Estrasburgo de 1971, que prevê um sistema hierárquico de símbolos independentes de linguagem para a classificação de patentes e modelos de utilidade de acordo com as diferentes áreas de tecnologia a que pertencem - para definir as tecnologias usadas, de acordo com os resultados obtidos na prospecção de artigos. Por fim, aplicou-se um filtro para direcionar a pesquisa dentro do período de 2016 até 2021, levando em consideração o tempo máximo de vigência de uma patente, gerando um total de 127 documentos que foram analisados e esmiuçados em planilha de Excel (Anexo 02). Para o *roadmap* elaborado neste trabalho foram selecionadas as patentes, de 2016 até 2021, cuja matéria-prima consistia no PET exausto – sozinho ou misturado com outros polímeros – o que resultou em 41 documentos.

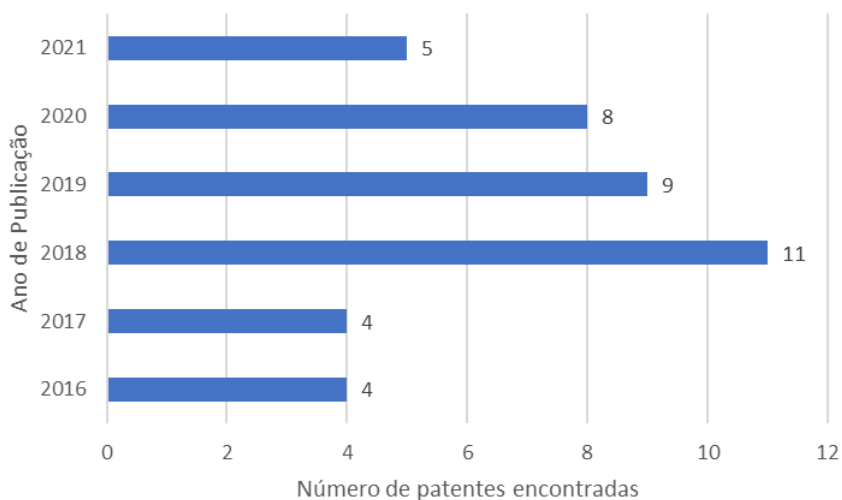
O objetivo principal desta fase é identificar os processos mais recorrentes e auxiliar na análise da tendência quanto ao reprocessamento do PET pós-consumo. Nas subseções abaixo tem-se a análise de informações como: país de origem, cronologia de publicação, instituições responsáveis pela elaboração (universidade, centro de pesquisa ou empresa), tipo de processo com base nas definições de reciclagem, apresentadas previamente neste trabalho, matéria-prima e produto obtido.

4.2.1. Análise macro

De forma análoga ao que foi feito com os artigos, serão discutidos os resultados obtidos quanto ao ano de publicação das patentes, o país de origem e as instituições responsáveis pela sua elaboração (universidade, centro de pesquisa ou empresa).

A Figura 27 mostra a quantidade de patentes solicitadas ao longo dos anos. É possível observar um aumento considerável entre 2017 e 2018 seguido de um período de redução, o que pode ser justificado pelo isolamento social, que promoveu uma restrição no trabalho através do *home-office*, seguido pela população para combater e se proteger da doença causada pelo vírus SARS-CoV-2. Quanto ao baixo número de patentes depositadas no ano de 2021, isto deve-se ao fato desta pesquisa ter sido realizada em abril de 2021.

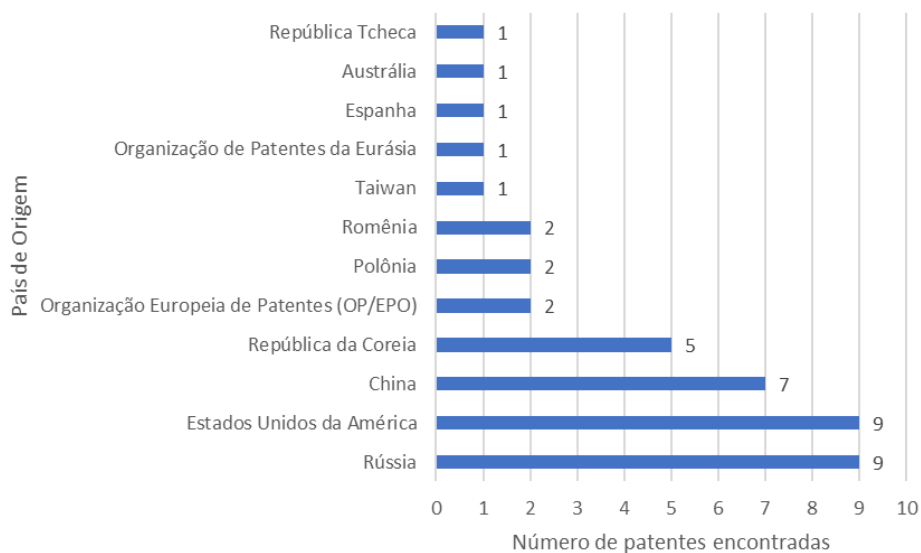
Figura 27 - Patentes publicados ao longo dos anos



Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de patentes, 2022

A Figura 28 apresenta a quantidade de patentes, dentro do escopo do presente trabalho, depositadas por cada país no período de 2016 a 2021.

Figura 28 - Patentes encontradas separadas pelos países de origem

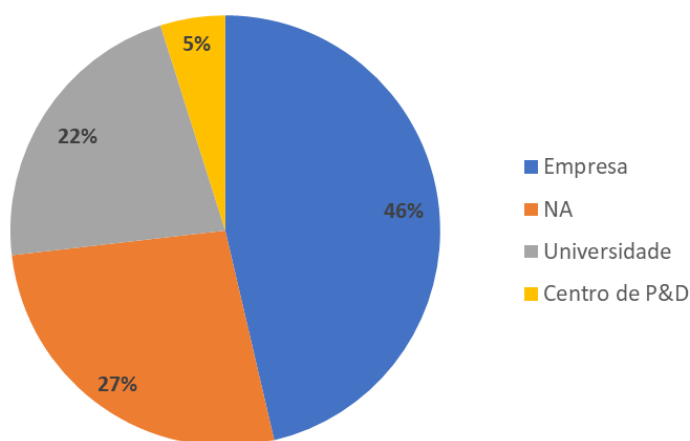


Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de patentes, 2022

Em relação à distribuição por país de origem, tem-se os Estados Unidos e a Federação Russa como grandes depositantes de patentes sobre o tema, o que

indica um enfoque destas nações no licenciamento da tecnologia desenvolvida e/ou melhorada. Observa-se que o Brasil ou qualquer outro integrante da América Latina não estão presentes nesta listagem, isso pode ser justificado pela ausência de empresas nacionais com o enfoque em PET pós-consumo nestes países, ou que as instituições presentes são multinacionais e, portanto, possuem vantagem econômica ao depositarem patentes no seu país de origem.

Figura 29 - Patentes encontradas separadas pela Instituição de Origem



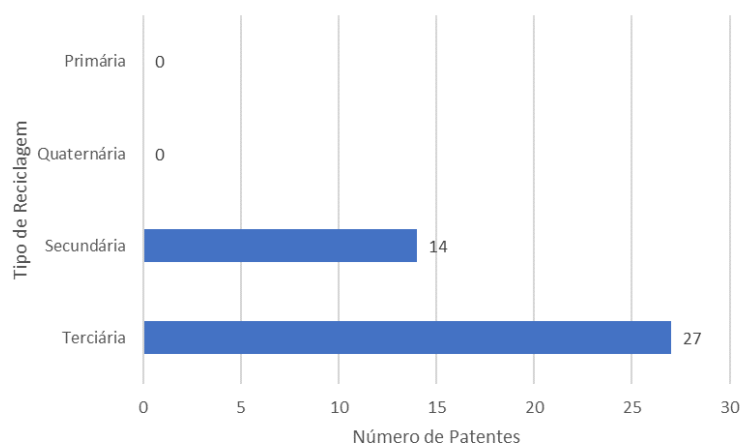
Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de patentes, 2022

Com relação a quantidade de patentes depositadas por Instituição a Figura 29 indica que, das quarenta e uma Instituições que depositaram patentes, tem-se 09 Universidades (22%), 02 Institutos de Pesquisas (5%), 19 Empresas (46%) e 11 “Não Divulgado” (27%). Isso se deve possivelmente ao fato do retorno econômico promovido – como, por exemplo, realização de parcerias e *ventures*, formação de *clusters* e licenciamento da tecnologia – para as Empresas depositantes. Quanto aos Institutos de Pesquisas, muitos são setores dentro da própria firma, o que ampara o baixo número de patentes depositadas, inferior ao das Universidades.

4.2.2. Análise meso

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos quanto ao tipo de reciclagem usada no tratamento do material exausto e o seu ano de deposição. Baseado nos resultados observados, optou-se por categorizar as tecnologias descritas nos documentos encontrados usando as definições existentes para os diversos tipos de reciclagem. A Figura 30 mostra a distribuição do tipo de reciclagem nas patentes encontradas.

Figura 30 - Patentes encontradas separadas pelo tipo de reciclagem



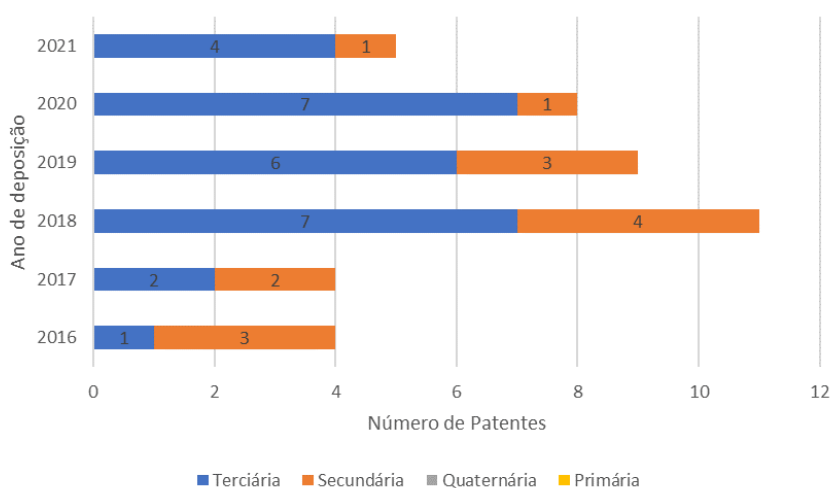
Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de patentes, 2022

Observa-se a predominância da reciclagem terciária para o reprocesso de PET reciclado, confirmando também o que foi visto na seção 4.1.2 durante análise dos artigos selecionados. Observa-se, para deposição de patentes, tecnologias de pré-tratamento desenvolvidas para facilitar os processos subsequentes de reciclagem. Cita-se como exemplo a patente desenvolvida por Suh Dong Eun; Lee Do Young; Jinhua Cheng (2018) com foco na utilização de microrganismo com

atividade de decomposição de materiais plásticos – em específico PET, PVC, PS, PP e PE – para pré-tratamento dos resíduos visando facilitar a reciclagem química posterior.

Foi realizada uma análise ao longo dos anos quanto ao tipo de reciclagem estudada para o reprocessamento do PET com o objetivo de identificar as tendências e investimentos que estão sendo realizados por centros de pesquisa e empresas, conforme mostra a Figura 31.

Figura 31 - Patentes encontradas separadas pelo tipo de reciclagem e pelo ano de deposição



Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de patentes, 2022

É possível constatar o aumento do número de patentes depositadas cuja tecnologia de reprocessamento do PET exausto é categorizada como reciclagem terciária, conforme também observado na seção 4.1.2. Cabe destacar que, a redução de patentes depositadas no ano de 2021 deve-se ao fato desta pesquisa ter sido realizada em abril de 2021.

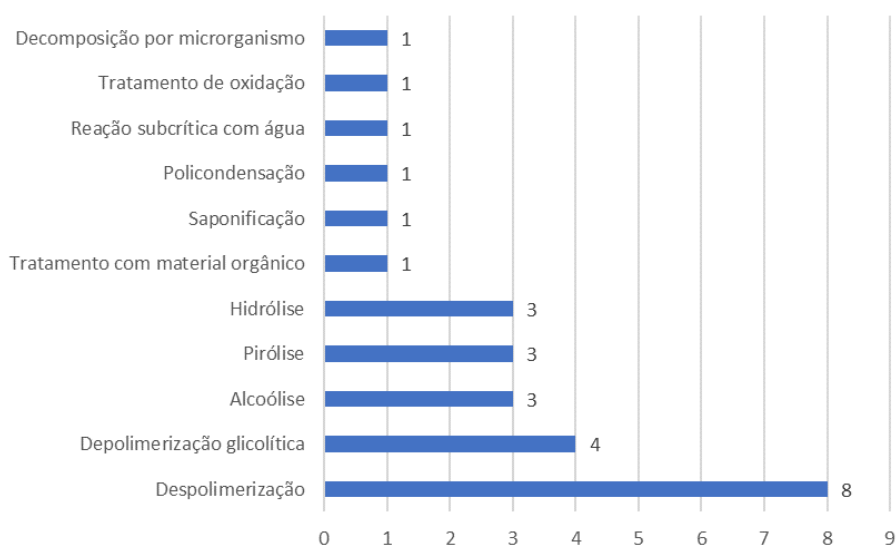
A redução no número de patentes depositadas a partir de 2019 pode ser justificada pelo isolamento social, que promoveu uma restrição no trabalho através

do *home-office*, seguido pela população para combater e se proteger da doença causada pelo vírus SARS-CoV-2.

4.2.3. Análise micro

Nesta seção, semelhante ao que foi feito para os artigos, serão discutidos os resultados obtidos quanto ao tipo de tecnologia, a matéria-prima utilizada e o produto gerado. Os documentos foram separados em dois tipos de tecnologias - oriundos de reciclagem secundária e terciária - com o objetivo de verificar as tendências na área. A Figura 32 mostra os principais tipos de tecnologias, dentro da reciclagem terciária ou química, abordados nos últimos anos.

Figura 32 – Patentes depositadas separados pelo tipo de reciclagem terciária

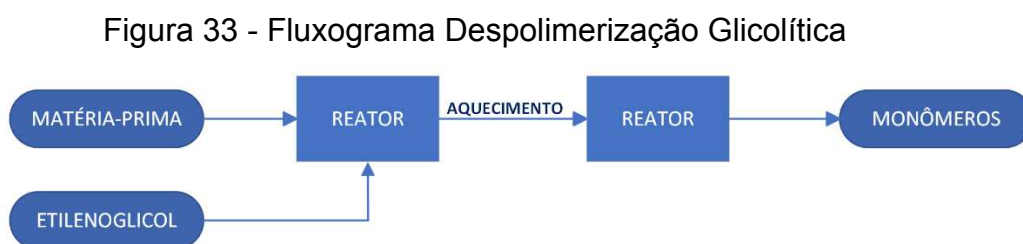


Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de patentes, 2022

Constata-se a predominância de quatro tecnologias, dentro da reciclagem química, para transformação do PET pós-consumo, são elas: despolimerização (geral e glicolítica), alcoólise, pirólise e hidrólise. Conforme já dito anteriormente, essas tecnologias se destacam devido à gama de produtos gerados durante o processo e ao maior valor agregado atrelado a estes produtos.

O conceito de despolimerização foi definido previamente na seção 4.1.3 durante a análise dos artigos. Kyung Han *et al.* (2018) descrevem a despolimerização de PET modificado com glicol sob catalisador misto – parte de despolimerização e parte de sal metálico – para produção de resina de poliéster insaturada ao reagir o intermediário resultante da despolimerização com um álcool polihídrico na presença de um catalisador de sal metálico. Este processo foi citado por Hyunmin Jung *et al.* (2019), Peng *et al.* (2021) e Jo Jung-Mo, Do-Young Hong e Hongran Yeo (2021) que promoveram maiores estudos sobre a despolimerização de polímeros contaminados com grupo funcional éster. Já Šrámek; Trzewiczek; Trávníček (2019) relatam um processo de produção de ácido tereftálico a partir de PET pós-consumo por meio de despolimerização aquecida, via micro-ondas, da mistura de reação e subsequente purificação. Recomenda-se que a purificação seja feita após agitação em água, dos produtos formados, e subsequente extração usando solvente orgânico – onde as impurezas dissolvidas são removidas da fase aquosa, ligando-se ao solvente, que é então separado – para precipitação do ácido tereftálico. Este processo foi citado por Debruin e Ekart (2021) e Yongsheng *et al.* (2022) e promoveu maiores estudos sobre a produção de compostos orgânicos por separação de átomos de hidrogênio ou grupos funcionais.

A despolimerização glicolítica ocorre quando o etilenoglicol (EG) é utilizado como agente de despolimerização. A Figura 33 apresenta o fluxograma deste processo.



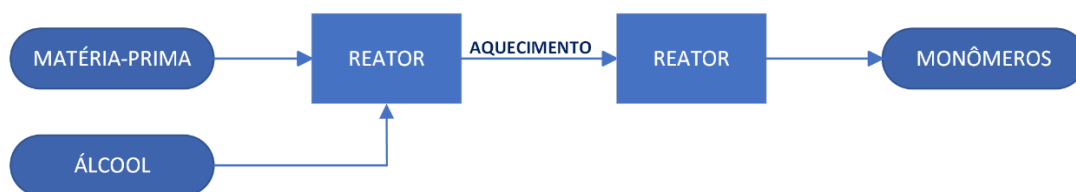
Fonte: A Autora, 2022

Monte (2018) refere-se a um processo de duas etapas - despolimerização inicial do PET reciclado na presença de uma mistura de monoetilenoglicol/neopentilglicol seguida de uma etapa de polimerização - para a produção de tereftalato de polietileno modificado com glicol. Esta patente foi citada por Maria Nunes Moraes e Luis Pereira Nunes (2017), Junwen e Yuan (2019), Thinon e Gauthier (2020) e Thinon e Gauthier (2021) e promoveu maior ciência sobre a despolimerização de PETs reciclados. Já Parrott (2018) utiliza um absorvedor de micro-ondas para otimizar a despolimerização glicolítica do PET reciclado via irradiação. Este método de degradação é realizado em duas etapas, primeiro tem-se a combinação de PET com etileno glicol em um sistema catalítico - compreendendo um catalisador e um absorvedor de micro-ondas - e então faz-se o aquecimento da mistura gerada por meio de micro-ondas em uma temperatura suficiente para produzir um produto de reação compreendendo BHET (bis(2-hidroxietil) tereftalato), que pode ser purificado e repolimerizado para formar um novo PET virgem.

O conceito de pirólise foi definido previamente na seção 4.1.3 durante a análise dos artigos. Ionete *et al.* (2020) discorrem sobre uma instalação concebida para a reciclagem energética, em fluxo contínuo, de resíduos plásticos - resultantes da recolha de resíduos urbanos - processados como grãos ou pellets de PEAD, PEBD, PET, PP ou PS. De acordo com a invenção, a instalação é feita de aço inoxidável e compreende um reator. A reação de pirólise pode ser potencializada por meio de um catalisador de sílica mesoporosa depositado sobre tela de aço inoxidável seguindo um processo hidrotérmico para produção de óleo de pirólise e/ou gás de pirólise. Já Dvorko *et al.* (2021) detalham o processamento de resíduos de PET, misturados com amina de baixo peso molecular, utilizando reator aquecido em um meio de gás inerte. A mistura resultante é fundida e resfriada até obter-se o produto com a viscosidade desejada.

Genduso, Luis e Van Der Bruggen (2015) definem o processo de Alcoólise, também conhecido como transesterificação, como a reação entre um grupo funcional éster e um grupo funcional álcool. A Figura 34 apresenta o fluxograma deste processo.

Figura 34 - Fluxograma Alcoólise



Fonte: A Autora, 2022

Du *et al.* (2018) elencam um método para preparar poliéter aromático a partir de resíduos de PET realizado em duas etapas, são elas: (i) alcoólise catalisada do

PET e; (ii) Cicloadição com inserção de óxido de etileno. O referido método apresenta um bom benefício económico e não influencia o rendimento de produto gerado. Já Gaudl *et al.* (2021) descrevem um método de fabricação de resinas de poliéster líquidas por meio de uma reação de alcoólise entre PET – mistura de polímero reciclado com virgem – e um ou mais monoálcoois e/ou polióis. O oligômero resultante desta reação sofre um processo de transesterificação usando óleos vegetais ou ésteres alquílicos de ácidos graxos e, por fim, é repolimerizado com ácidos ou anidridos para produção de tintas litográficas. Esta patente foi citada por Dieker *et al.* (2020) e Osorio e Garrish (2021) e promoveu maior ciência sobre a utilização de PETs reciclados para produção de resinas.

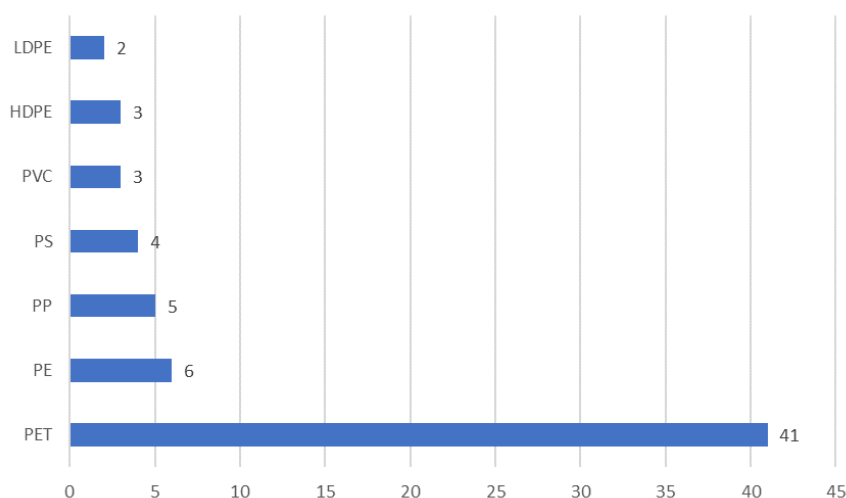
O conceito de hidrólise foi definido previamente na seção 4.1.3 durante a análise dos artigos. Wang *et al.* (2016) descrevem um sistema de reciclagem para o método de reciclagem terciária de resíduos de materiais PET com o objetivo de fornecer um método de baixo-custo que reduza o tempo de produção e aumente a limpeza do produto acabado, consequentemente, provocando a melhora da qualidade integral do produto processado. Esta patente foi citada por LIN *et al.* (2017) e auxiliou na otimização e melhoria do sistema de reciclagem para resíduos de PETs. Já Lakeev; Ishalina; Minnigulov (2017) relatam um método para hidrólise alcalina de resíduos de PET com o objetivo de produzir ácido tereftálico. Este método consiste na hidrólise de PET com hidróxido de sódio em um solvente com aquecimento, seguido pela adição de água até que o sal dissódico resultante seja completamente dissolvido, a camada aquosa é separada do solvente e a precipitação do ácido tereftálico é feita a partir de uma solução aquosa de ácido clorídrico concentrado seguida de filtração, lavagem e secagem do produto obtido.

Esta patente foi citada por Kulyukhin; Gordeev; Krasavina (2020a) e promoveu maior ciência sobre a utilização de PETs reciclados para produção de ácido tereftálico.

Quanto as patentes, onde o reproprocessamento do PET é feito via reciclagem mecânica, analisou-se que todas as patentes com necessidade de calor para execução do procedimento descrito no documento. O entendimento desta seção é semelhante ao visto durante a análise dos artigos, onde os principais equipamentos usados são moinhos, estufas e extrusoras.

As matérias-primas utilizadas são apresentadas na Figura 35. É importante ressaltar que todas as patentes possuem o PET como matéria-prima principal e, portanto, esta análise tem como objetivo verificar a aplicação das tecnologias de reproprocessamento para o caso de misturas, situação muito comum no descarte de resíduos plásticos. Novamente, tem-se a mesma conclusão observada na análise dos artigos, que o PP e o PE são os polímeros mais presentes junto ao PET pós-consumo.

Figura 35 - Matérias-primas utilizadas nas patentes encontradas



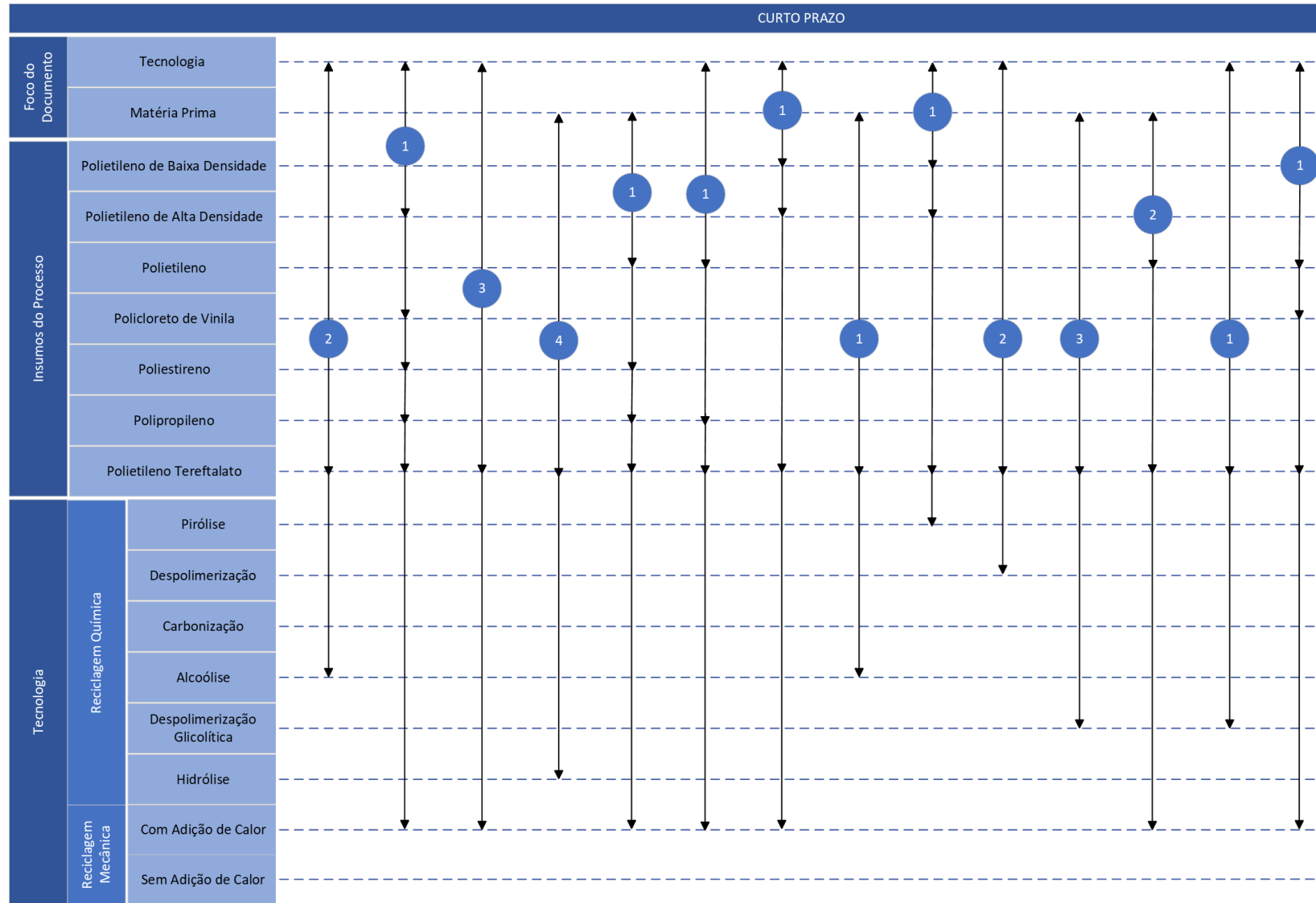
Fonte: A Autora a partir dos dados obtidos na pesquisa de patentes, 2022

4.3 Análise do technology roadmap

4.3.1. Curto prazo

No corte temporal do *technology roadmap* para curto prazo, representado na Figura 36, é possível observar que o foco das empresas e institutos de pesquisa encontra-se na tecnologia, ou seja, otimizar os produtos formados, reduzir os gastos com utilidades e melhorar o desempenho dos equipamentos utilizados.

Figura 36 - Technology Roadmap – Curto Prazo



Fonte: A Autora, 2022

Quanto ao insumo utilizado, Booth *et al.* (2019), Gaudl *et al.* (2021), Šrámek; Trzewiczek; Trávníček (2019), Parrott (2018), Kyung Han *et al.* (2018), Monte (2018), Kowalik Bogdan (2018), Du *et al.*, (2018), Wang Lincong (2017), Ризаев (2017), Lakeev; Ishalina; Minnigulov (2017), Степанов *et al.* (2016) e Wang *et al.* (2016) reivindicam a utilização do PET “puro”, ou seja, sem a presença de outros polímeros. Isso impacta consideravelmente os processos desenvolvidos pois, torna-se necessário a adição de uma etapa de tratamento para realizar a separação do PET dos demais polímeros presentes nos resíduos urbanos. Já Stepanov; Stepanova (2019), Ionete *et al.* (2020), Stanhope; Zehner; Buhrts (2018), Toroyan; Avagimyan (2018), Clark (2017), Valdmaa; Käsar; Saareväli (2016) e Chang (2016) reivindicam a utilização do PET na presença de outros polímeros.

Quanto ao tipo de tecnologia, constata-se uma predileção pela reciclagem química, possivelmente devido a geração de produtos de maior valor agregado. Ressalta-se que, visando facilitar a compreensão e a leitura do mapa, foram selecionados os principais processos observados na etapa de prospecção tecnológica. Quanto ao tipo de *player*, observa-se a presença majoritária de empresas devido ao custo envolvido na publicação de patentes, no ganho financeiro esperado pela licença da tecnologia patenteada e, caso seja a estratégia adotada, na proteção do processo por, pelo menos, vinte anos garantindo sua utilização exclusiva no mercado.

4.3.2. Médio prazo

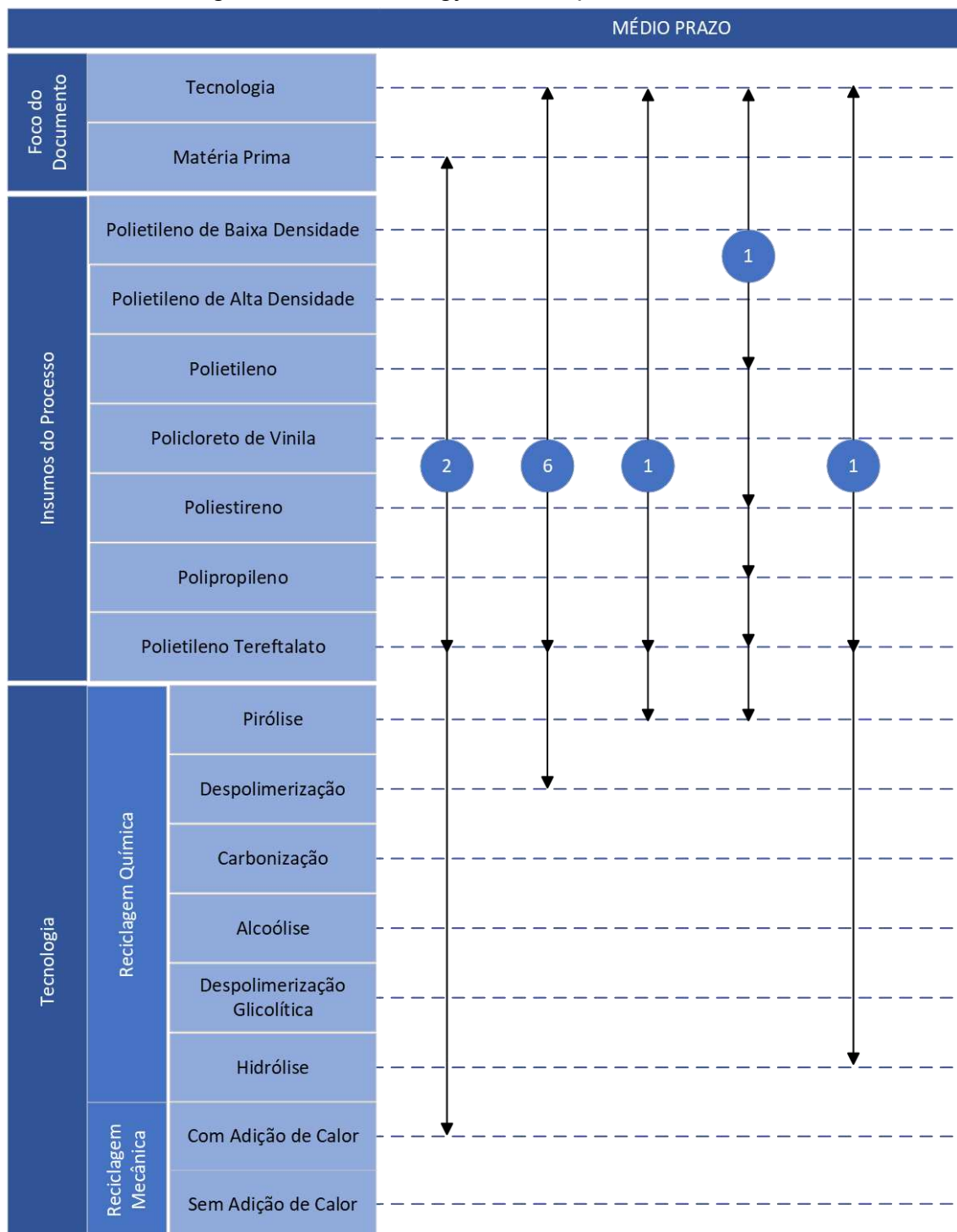
No corte temporal do *technology roadmap* para médio prazo, representado na Figura 37, é possível observar que o foco das empresas e institutos de pesquisa ainda se encontra na tecnologia, ou seja, otimizar os produtos formados, reduzir os gastos com utilidades e melhorar o desempenho dos equipamentos utilizados. Essa conclusão tem fundamento, pois todos os documentos presentes neste corte temporal são pedidos de patentes e patentes recentemente concedidas que, em sua maioria, são elaborados por empresas com o objetivo de aprimorar o processo atualmente em operação nas suas fábricas.

Quanto ao insumo utilizado, semelhante ao que foi visto na tendência prevista para curto prazo, Strelnikov *et al.* (2021), Hyunmin Jung *et al.* (2019), Pavón Vargas *et al.* (2021), Igor *et al.* (2021), Wu *et al.* (2020), Kulyukhin; Gordeev; Krasavina (2020), Lee *et al.* (2020), Zuo; Wang (2020) e Parrott (2020) reivindicam a utilização do PET “puro”, ou seja, sem a presença de outros polímeros. Essa observação, levando em consideração a estratégia das empresas responsáveis pelos documentos elaborados, pode ser explicada pela aplicação do conceito de Economia Circular, onde a instituição desenvolve processos para reutilizar seus produtos – exaustos diretamente da linha de produção ou após o seu consumo por terceiros – visando a geração de novos bens. (Kjaer *et al.*, 2019) Já Teplitsky; Dzyura (2020) reivindicam a utilização do PET na presença de outros polímeros.

Constata-se uma predileção pela reciclagem química, novamente, de acordo com a estratégia dos *players* envolvidos na elaboração das patentes e desenvolvimento dos processos, a geração de produtos de maior valor agregado é

benéfica para as empresas e parceiros devido à proteção gerada pela patente e à possibilidade de comercialização da tecnologia desenvolvida. Quanto ao tipo de *player*, semelhante ao que foi analisado no corte temporal de curto prazo, observa-se a presença empresas.

Figura 37 - Technology Roadmap – Médio Prazo



Fonte: A Autora, 2022

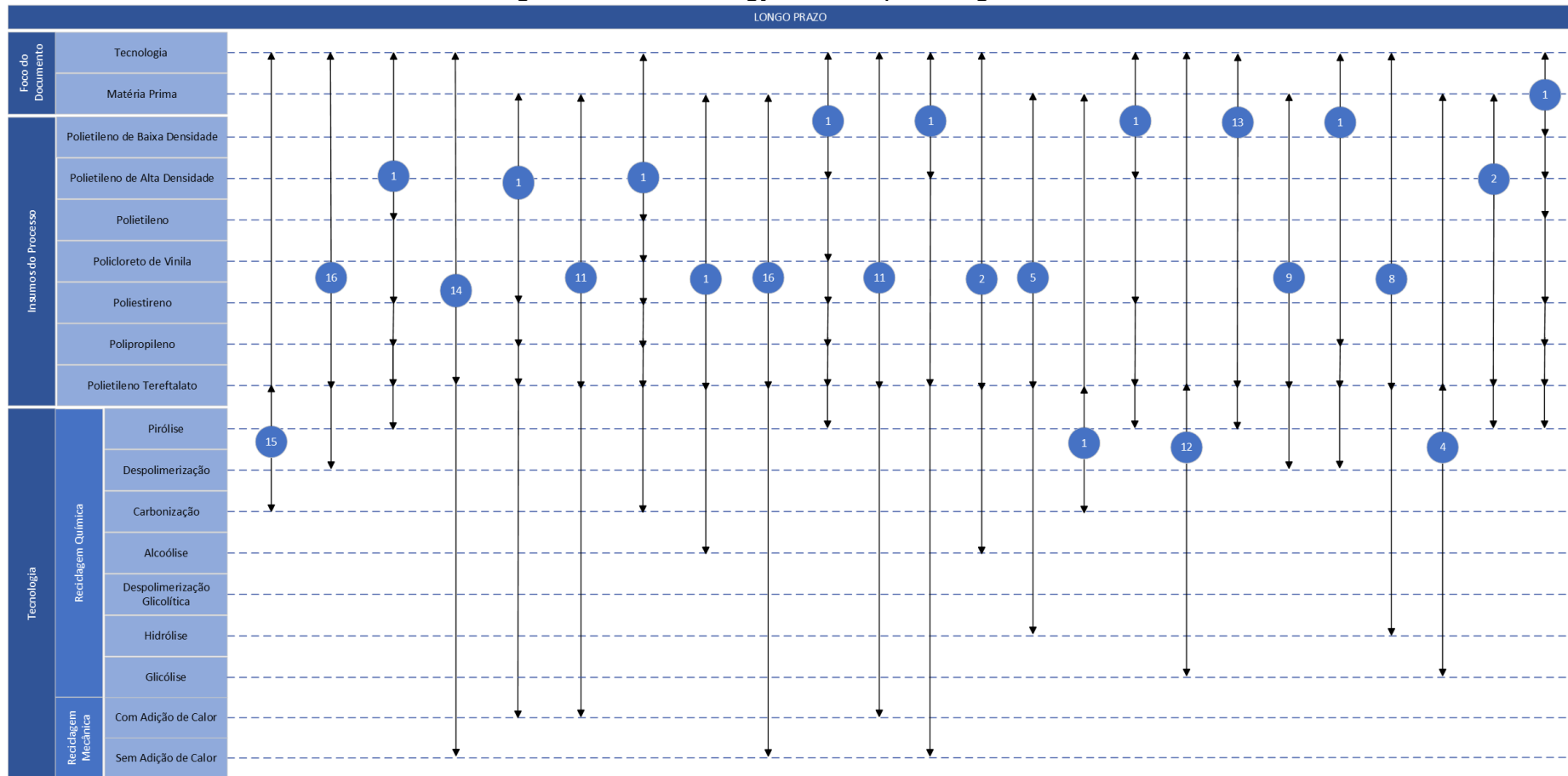
4.3.3. Longo prazo

No corte temporal do *technology roadmap* para longo prazo, representado na Figura 38, é possível observar que o foco segue na tecnologia, ou seja, otimizar os produtos formados, reduzir os gastos com utilidades e melhorar o desempenho dos equipamentos utilizados. Essa análise pode ser explicada pelo fato de todos os documentos presentes neste corte temporal serem artigos elaborados, em sua maioria, por universidades com o objetivo de aprimorar os processos implementados por empresas e institutos de pesquisa.

Quanto ao insumo utilizado, semelhante ao que foi visto nas tendências anteriores observa-se uma predileção pela utilização do PET “puro”, ou seja, sem a presença de outros polímeros. Essa observação, levando em consideração que os documentos foram elaborados, em sua maioria, por universidades, pode ser explicada por duas vertentes, são elas:

- I. Pela necessidade de reutilizar os materiais exaustos, de forma a reduzir a quantidade de lixo urbano presente nas cidades;
- II. Pela difusão do conceito de Economia Circular, onde se promove o desenvolvimento de novos processos para reutilizar produtos exaustos diretamente da linha de produção ou após o seu consumo por terceiros.

Figura 38 - Technology Roadmap – Longo Prazo



Fonte: A Autora, 2022

Quanto ao tipo de *player*, observa-se a presença majoritária de universidades, o que é condizente com os documentos presentes neste corte temporal, artigos. É de conhecimento geral que empresas e institutos de pesquisas possuem como foco a elaboração de patentes, promovendo a proteção da tecnologia desenvolvida e/ou otimizada, enquanto as universidades possuem como foco a elaboração de artigos, promovendo a disseminação de conhecimento sobre o tema.

CONCLUSÕES

Este estudo foi elaborado um *technology roadmap* das técnicas de reprocessamento de PET exausto com o objetivo de identificação das tendências tecnológicas e mercadológicas para o momento atual. Como principais resultados destaca-se:

- (i) a busca por tecnologias alinhadas a reciclagem terciária para lidar com o PET exausto;
- (ii) a preferência pela utilização do PET “puro”, ou seja, sem a presença de outros polímeros; e
- (iii) o foco das universidades, empresas e institutos de pesquisa na tecnologia, ou seja, em otimizar os produtos formados, reduzir os gastos com utilidades e melhorar o desempenho dos equipamentos já utilizados.

A obtenção dessas informações e a sua disposição final serão relevantes para tomadas de decisão de empresas interessadas no PET.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir são colocadas outras diretrizes, para alinhar essa e outras pesquisas futuras:

- Complementar a pesquisa realizada por meio da adição e análise dos *players* envolvidos nos processos de forma a identificar possíveis parcerias e traçar tendências mercadológicas;
- Atualizar o presente trabalho de forma a focar nos processos categorizados como reciclagem química visando alinhamento com as principais empresas no setor;
- Elaborar um *technology roadmap* com foco no reprocessamento de misturas plásticas com o objetivo de esboçar as possibilidades existentes e as tendências para o tratamento do lixo urbano de origem polimérica.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST. **Perfil 2020 - A indústria de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil**. [S.l: s.n.], 2020.

ABLP, A. B. DE R. S. E L. P. O futuro da recuperação energética no Brasil. **Revista Limpeza Pública**, v. 84, p. 1–68, 2013.

AHMAD, A. F. *et al.* Effect of waste polyethylene terephthalate (PET) on properties of road aggregate. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 469, p. 012056, 16 jan. 2019.

AHMED, W. *et al.* Ionic Liquid Potential to Recycle Polymeric Waste: An Experimental Investigation. **Materials Research**, v. 23, n. 6, 2020.

AL-ENIZI, A. M. *et al.* Synthesis of NiOx@NPC composite for high-performance supercapacitor via waste PET plastic-derived Ni-MOF. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, p. 107655, fev. 2020a.

AL-ENIZI, A. M. *et al.* Utilization of waste polyethylene terephthalate bottles to develop metal-organic frameworks for energy applications: A clean and feasible approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119251, mar. 2020b.

AL-HAYDARI, I. S.; AL-HAIDARI, H. S. Mechanical Properties of Polyethylene Terephthalate-Modified Pavement Mixture. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 870, n. 1, p. 012073, 1 jun. 2020.

ALHOKBANY, N. *et al.* Cost-effective synthesis of NiCo₂O₄@nitrogen-doped carbon nanocomposite using waste PET plastics for high-performance supercapacitor. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 31, n. 19, p. 16701–16707, 18 out. 2020.

ALI, T. K. M. *et al.* Properties of eco-friendly pervious concrete containing polystyrene aggregates reinforced with waste PET fibers. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 5, n. 3, p. 77, 2 dez. 2020.

ALIGHIRI, D. *et al.* Processing of recycled waste PET (polyethylene terephthalate) plastics bottle into for the lightweight and reinforcement bricks. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1321, n. 2, p. 022023, 1 out. 2019.

AL-SABAGH, A. M. *et al.* Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 25, n. 1, p. 53–64, mar. 2016.

ALVES, T. F. R. *et al.* Applications of Natural, Semi-Synthetic, and Synthetic Polymers in Cosmetic Formulations. **Cosmetics**, v. 7, n. 4, p. 75, 25 set. 2020.

AMELI, A. *et al.* Performance evaluation of binders and Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures modified by Ground Tire Rubber (GTR), waste Polyethylene Terephthalate

(PET) and Anti Stripping Agents (ASAs). **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118932, ago. 2020.

AMERI, M.; NASR, D. Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures. **Petroleum Science and Technology**, v. 35, n. 1, p. 99–104, 2 jan. 2017.

ARAHMAN, N. *et al.* Effect of PVP on the characteristic of modified membranes made from waste PET bottles for humic acid removal. **F1000Research**, v. 6, p. 668, 16 jun. 2017.

ASHOOR, AMIR. S.; KAREEM, M. M.; AL-BAIATI, M. N. Improved asphalt binder using recycle polyethylene terephthalate polymer. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 571, p. 012094, 8 ago. 2019.

AZH DARPOUR, A. M.; NIKOUDEL, M. R.; TAHERI, M. The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 55–62, abr. 2016.

AZMI, N. B. *et al.* Performance of composite sand cement brick containing recycle concrete aggregate and waste polyethylene terephthalate with different mix design ratio. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 140, p. 012129, abr. 2018.

BAGHAEE MOGHADDAM, T. *et al.* Optimization of asphalt and modifier contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology. **Measurement**, v. 74, p. 159–169, out. 2015.

BAGHAEE MOGHADDAM, T.; SOLTANI, M.; KARIM, M. R. Stiffness modulus of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixture: A statistical analysis of the laboratory testing results. **Materials & Design**, v. 68, p. 88–96, mar. 2015.

BAJAD, G. *et al.* Processing of mixed-plastic waste to fuel oil, carbon nanotubes and hydrogen using multi-core reactor. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 121, p. 205–214, nov. 2017.

BAL, K. *et al.* Epoxy-based paints from glycolysis products of postconsumer PET bottles: synthesis, wet paint properties and film properties. **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 14, n. 3, p. 747–753, 10 maio 2017.

BAMIGBOYE, G. O. *et al.* Experimental Study on the Use of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) and River Sand in Roof Tile Production. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1378, n. 4, p. 042105, 1 dez. 2019.

BARTH, M. *et al.* Effect of hydrolysis products on the enzymatic degradation of polyethylene terephthalate nanoparticles by a polyester hydrolase from *Thermobifida fusca*. **Biochemical Engineering Journal**, v. 93, p. 222–228, jan. 2015.

BASHA, M. H.; SULAIMAN, S. A.; UEMURA, Y. Co-gasification of palm kernel shell and polystyrene plastic: Effect of different operating conditions. **Journal of the Energy Institute**, v. 93, n. 3, p. 1045–1052, jun. 2020.

BHATTACHARYYA, A. *et al.* Preparation of polyurethane–alginate/chitosan core shell nanoparticles for the purpose of oral insulin delivery. **European Polymer Journal**, v. 92, p. 294–313, jul. 2017.

BOOTH, H. J. *et al.* **Recycled polyethylene terephthalate compositions, fibers and articles produced therefrom, and methods for producing same**. United States of America, 2019.

BORSCHIVER, S.; DA SILVA, A. L. R. **TECHNOLOGY ROADMAP - Planejamento Estratégico para alinhar Mercado-Produto-Tecnologia**. [S.I.]: Editora Interciencia, 2016.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2010.

BUASRI, A. *et al.* Synthesis of PET-PLA copolymer from recycle plastic bottle and study of its applications in the electrochromic devices with graphene conductive ink. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 5, p. 11060–11067, 2018.

BÜYÜKYONGA, Ö. N. *et al.* The usage of novel acrylic-modified water-reducible alkyd resin obtained from post-consumer PET bottles in water-based paint formulation. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 1, p. 187–196, 23 jan. 2020.

ÇAM, Ç.; BAL, A.; GÜÇLÜ, G. Synthesis and film properties of epoxy esters modified with amino resins from glycolysis products of postconsumer PET bottles. **Polymer Engineering & Science**, v. 55, n. 11, p. 2519–2525, nov. 2015.

CANEVAROLO, S. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CARNIEL, A. *et al.* Lipase from *Candida antarctica* (CALB) and cutinase from *Humicola insolens* act synergistically for PET hydrolysis to terephthalic acid. **Process Biochemistry**, v. 59, p. 84–90, ago. 2017.

CARR, C. M.; CLARKE, D. J.; DOBSON, A. D. W. Microbial Polyethylene Terephthalate Hydrolases: Current and Future Perspectives. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, 11 nov. 2020.

CASTRO, A. M. DE *et al.* High-fold improvement of assorted post-consumer poly(ethylene terephthalate) (PET) packages hydrolysis using *Humicola insolens* cutinase as a single biocatalyst. **Process Biochemistry**, v. 81, p. 85–91, jun. 2019.

CHANG, Y.-L. **Method of producing eco-friendly electronic boards using recycled plastic waste**. Taiwan, 2016.

CHATTOPADHYAY, J. *et al.* Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET

(polyethylene terephthalate)) and product analysis. **Energy**, v. 103, p. 513–521, maio 2016.

CHINIGO, G. *et al.* Pyridazines and Their Benzo Derivatives. In: **Comprehensive Heterocyclic Chemistry IV**. [S.l.]: Elsevier, 2022. p. 1–85.

CHOUDHARY, R.; KUMAR, A.; MURKUTE, K. Properties of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt Mixes: Dependence on PET Size, PET Content, and Mixing Process. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 19 fev. 2018.

ÇINAR, M. E.; KAR, F. Characterization of composite produced from waste PET and marble dust. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 734–741, fev. 2018.

CLARK, T. R. **Systems and methods for manufacturing bulked continuous filament**. Australia, 2017.

COMMEH, M. *et al.* Plastic Fuel Conversion and Characterisation: A Waste Valorization Potential for Ghana. **MRS Advances**, v. 5, n. 26, p. 1349–1356, 17 maio 2020.

CORINALDESI, V.; DONNINI, J.; NARDINOCCHI, A. Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 337–345, set. 2015.

COUTINHO, P.; BOMTEMPO, J. V. A technology roadmap in renewable raw materials: a basis for public policy and strategies in Brazil. **Química Nova**, v. 34, n. 5, p. 910–916, 2011.

CURTZWILER, G. W. *et al.* Ultraviolet protection of recycled polyethylene terephthalate. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 134, n. 32, p. 45181, 20 ago. 2017.

DEBORAH D.L CHUNG. **Carbon Composites**. New York: Elsevier, 2017.

DEBRUIN, B. R.; EKART, M. P. **Chemical recycling of waste plastics from various sources, including wet fines**. France, 2021.

DIEKER, J. *et al.* **Water-soluble or dispersible polyester resins made from terephthalate plastic materials useful as dispersant resins for inks**. , 6 jan. 2020. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/47/df/49/beffd6f6a9cd67/WO2020146220A1.pdf>. Acesso em: 8 out. 2022

DJAHED, B. *et al.* A novel and inexpensive method for producing activated carbon from waste polyethylene terephthalate bottles and using it to remove methylene blue dye from aqueous solution. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 21, p. 9871–9880, 2 maio 2016.

DOĞAN-SAĞLAMTIMUR, N. *et al.* Producing of qualified oil and carbon black from waste tyres and pet bottles in a newly designed pyrolysis reactor. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 135, n. 6, p. 3339–3351, 1 mar. 2019.

DU, P. *et al.* **Method for preparing aromatic polyether ester polyol from waste PET (polyethylene terephthalate) as raw materials**. China, 2018.

DVORKO, I. M. *et al.* **Method for obtaining secondary polyethylene terephthalate destruction products for construction materials**. Russian, 2021.

EDRIS Q. L. *et al.* Análise do conteúdo alimentar de tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) mortas em encalhes na Costa de Peruíbe, litoral Sul de São Paulo. **UNISANTA Bioscience**, v. 07, n. 6, p. 77–98, 2018.

EL ESSAWY, N. A. *et al.* A novel one-step synthesis for carbon-based nanomaterials from polyethylene terephthalate (PET) bottles waste. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 67, n. 3, p. 358–370, 4 mar. 2017.

ELESSAWY, N. A. *et al.* Development of High-Performance Supercapacitor based on a Novel Controllable Green Synthesis for 3D Nitrogen Doped Graphene. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1129, 4 fev. 2019.

EL-NAGA, I. A.; RAGAB, M. Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 219, p. 81–90, set. 2019.

ESFANDABAD, A. S. *et al.* Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET). **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 120410, out. 2020.

ESI, B.; BAYKAL, P. D. Investigation of tensile strength and elongation properties of chenille upholstery fabrics including recycling polyester yarns. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 15, p. 1-10, 27 jan. 2020.

FANG, C.; YANG, R. Dispersion of multiwalled carbon nanotubes in waterborne polyurethane emulsions derived from alcoholysis products of waste PET and its effect on properties. **Polymer Engineering & Science**, v. 58, n. 12, p. 2149–2155, dez. 2018.

FARRAPO, C. L. *et al.* Cellulose Associated with Pet Bottle Waste in Cement Based Composites. **Materials Research**, v. 20, n. 5, p. 1380–1387, 31 jul. 2017.

FERNÁNDEZ, M. E. *et al.* Degradation Process of Postconsumer Waste Bottle Fibers Used in Portland Cement–Based Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 10, out. 2017.

FOTI, D.; LERNA, M. New Mortar Mixes with Chemically Depolymerized Waste PET Aggregates. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, p. 1–9, 12 dez. 2020.

GARCIA, M. L.; BRAY, O. H. **Fundamentals of technology roadmapping**. United States: [s.n.], 1997

GAUDL, K.-U. *et al.* **Liquid modified pet polyesters for lithographic inks**. United States of America, 2021.

GENDUSO, G.; LUIS, P.; VAN DER BRUGGEN, B. Pervaporation membrane reactors (PVMRs) for esterification. **Membrane Reactors for Energy Applications and Basic Chemical Production**, p. 565–603, 1 jan. 2015.

GEYER, R. Production, use, and fate of synthetic polymers. In: **Plastic Waste and Recycling**. [S.I.]: Elsevier, 2020. p. 13–32.

GOPINATH, K. P. *et al.* **A critical review on the influence of energy, environmental and economic factors on various processes used to handle and recycle plastic wastes**: Development of a comprehensive index. *Journal of Cleaner Production*. [S.I.]: Elsevier, 2020.

HALIM, N. F. A.; TAIB, N.; AZIZ, Z. A. The performance of thermal property in concrete containing waste pet (polyethylene terephthalate) as an alternative sustainable building material. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 452, n. 1, p. 012108, 1 abr. 2020.

HERMANOVÁ, S. *et al.* Biodegradation of waste PET based copolyesters in thermophilic anaerobic sludge. **Polymer Degradation and Stability**, v. 111, p. 176–184, jan. 2015.

HIRAGA, K. *et al.* Biodegradation of waste <sc>PET</sc>. **EMBO reports**, v. 20, n. 11, 5 nov. 2019.

HONGSRIPHAN, N. *et al.* Thermoplastic composites between polybutylene succinate and recycled PET adding hollow glass microspheres. **International Journal of Plastics Technology**, v. 22, n. 2, p. 312–325, 13 dez. 2018.

HRONEC, M.; FULAJTÁROVÁ, K. Terephthalic acid from waste PET: An efficient and reusable catalyst for xylose conversion into furfural. **Catalysis Today**, v. 324, p. 27–32, mar. 2019.

HU, H.; WU, Y.; ZHU, Z. Optimization of Microwave-Assisted Preparation of TPA from Waste PET Using Response Surface Methodology. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 1, p. 375–382, 13 jan. 2018.

HU, Y. *et al.* Synthesis of poly(ethylene terephthalate) based on glycolysis of waste PET fiber. **Journal of Macromolecular Science, Part A**, v. 57, n. 6, p. 430–438, 2 jun. 2020.

HYUNMIN JUNG *et al.* **Recovery method for direct polyol from polyethylene terephthalate wastes**. Korea, 2019.

IGOR, M. D. *et al.* **Method of producing decomposition products of secondary polyethylene terephthalate for structural materials**. Russian, 2021.

ILEVBARE, I. M.; PROBERT, D.; PHAAL, R. Towards risk-aware roadmapping: Influencing factors and practical measures. **Technovation**, v. 34, n. 8, p. 399–409, ago. 2014.

IONETE, R. E. *et al.* **Installation for recycling plastic waste**. Romania, 2020.

ISIQUE, W. D.; DA SILVA, T. S.; MATSUMOTO, T. A composite of polyethylene terephthalate and sugarcane ash-coated $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (PETSCA/Fe) as a low-cost adsorbent material. **Materials Letters**, v. 188, p. 423–425, fev. 2017.

ISLAM, MD. J.; MEHERIER, MD. S.; ISLAM, A. K. M. R. Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 946–951, out. 2016.

IUPAC. Compendium of Chemical Terminology 2nd ed. (the “Gold Book”). **Blackwell Scientific Publications, Oxford**, 2014.

JO JUNG-MO; DO-YOUNG HONG; HONGRAN YEO. **Efficient depolymerization method of polymer comprising ester functional group, and purification method thereof**. Korea, 2021.

JOVIČIĆ, M. *et al.* Mechanical and thermal properties of eco-friendly coating obtained from products of waste polyethylene terephthalate. **Zastita materijala**, v. 59, n. 3, p. 436–441, 2018.

JUNG, K.-W.; KIM, J.-H.; CHOI, J.-W. Synthesis of magnetic porous carbon composite derived from metal-organic framework using recovered terephthalic acid from polyethylene terephthalate (PET) waste bottles as organic ligand and its potential as adsorbent for antibiotic tetracycline hydrochloride. **Composites Part B: Engineering**, v. 187, p. 107867, abr. 2020.

JUNWEN, L.; YUAN, L. **A kind of novel GAG material and preparation method thereof**. China, 2019.

KAMALI, A. R.; YANG, J.; SUN, Q. Molten salt conversion of polyethylene terephthalate waste into graphene nanostructures with high surface area and ultra-high electrical conductivity. **Applied Surface Science**, v. 476, p. 539–551, maio 2019.

KAPPEL*, T. A. Perspectives on roadmaps: how organizations talk about the future. **Journal of Product Innovation Management**, v. 18, n. 1, p. 39–50, jan. 2001.

KATYAL, A.; MORRISON, R. D. Forensic applications of contaminant transport models in the subsurface. **Introduction to Environmental Forensics**, p. 513–575, 1 jan. 2007.

KAUR, B. *et al.* Porous carbons derived from polyethylene terephthalate (PET) waste for CO₂ capture studies. **Journal of Environmental Management**, v. 242, p. 68–80, jul. 2019.

KAWAI, F.; KAWABATA, T.; ODA, M. Current State and Perspectives Related to the Polyethylene Terephthalate Hydrolases Available for Biorecycling. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 24, p. 8894–8908, 22 jun. 2020.

KAZI TANI, N. *et al.* Prediction models of mechanical properties for pet-mortar composite in sodium sulphate aggressive mediums. **MATEC Web of Conferences**, v. 149, p. 01051, 14 fev. 2018.

KHALID, F. S. *et al.* The mechanical properties of brick containing recycled concrete aggregate and polyethylene terephthalate waste as sand replacement. **E3S Web of Conferences**, v. 34, p. 01001, 19 mar. 2018.

KHAN, M. I. *et al.* Effect of Irradiated and Non-Irradiated Waste PET Based Cementitious Grouts on Flexural Strength of Semi-Flexible Pavement. **Materials**, v. 12, n. 24, p. 4133, 10 dez. 2019.

KHOIRI, M. *et al.* Effect of Compaction Temperatures on Marshall Properties on Hot Rolled Sheet-Base mixture with the addition of plastic waste. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 436, n. 1, p. 012019, 1 jan. 2020.

KIM, H. T. *et al.* Biological Valorization of Poly(ethylene terephthalate) Monomers for Upcycling Waste PET. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 24, p. 19396–19406, 16 dez. 2019.

KIM, J. W. *et al.* Functional expression of polyethylene terephthalate-degrading enzyme (PETase) in green microalgae. **Microbial Cell Factories**, v. 19, n. 1, p. 97, 28 dez. 2020a.

KIM, K. S. *et al.* The effect of waste PET addition on PFO-based anode materials for improving the electric capacity in lithium-ion battery. **Carbon Letters**, v. 30, n. 5, p. 545–553, 17 out. 2020b.

KIM, S.; PARK, C.; LEE, J. Reduction of polycyclic compounds and biphenyls generated by pyrolysis of industrial plastic waste by using supported metal catalysts: A case study of polyethylene terephthalate treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 392, p. 122464, jun. 2020.

KJAER, L. L. *et al.* Product/Service-Systems for a Circular Economy: The Route to Decoupling Economic Growth from Resource Consumption? **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 22–35, 13 fev. 2019.

KLÍMEK, P. *et al.* Utilization of air-plasma treated waste polyethylene terephthalate particles as a raw material for particleboard production. **Composites Part B: Engineering**, v. 90, p. 188–194, abr. 2016.

KO, S. *et al.* Preparation of synthetic graphite from waste PET plastic. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 83, p. 449–458, mar. 2020.

KONDRINA, K. M. *et al.* High-pressure synthesis of microdiamonds from polyethylene terephthalate. **Diamond and Related Materials**, v. 83, p. 190–195, mar. 2018.

KOSHTI, R.; MEHTA, L.; SAMARTH, N. Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate: A Mini-Review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 8, p. 3520–3529, 5 ago. 2018.

KOWALIK BOGDAN. **Production line for manufacturing the packing band from polyethylene terephthalate obtained from recycling and method for producing it**. Poland, 2018.

KRASNA, W. A.; NOOR, R.; RAMADANI, D. D. Utilization of Plastic Waste Polyethylene Terephthalate (Pet) as a Coarse Aggregate Alternative in Paving Block. **MATEC Web of Conferences**, v. 280, p. 04007, 8 maio 2019.

KRATISH, Y. *et al.* Polyethylene Terephthalate Deconstruction Catalyzed by a Carbon-Supported Single-Site Molybdenum-Dioxo Complex. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 59, n. 45, p. 19857–19861, 2 nov. 2020.

KULYUKHIN, S. A.; GORDEEV, A. V.; KRASAVINA, E. P. **Method of producing terephthalic acid from polyethylene terephthalate wastes**. Russian, 2020a.

KULYUKHIN, S. A.; GORDEEV, A. V.; KRASAVINA, E. P. **Method of producing terephthalic acid from polyethylene terephthalate wastes**. Russian, 2020b.

KULYUKHIN, S. A.; GORDEEV, A. V.; SELIVERSTOV, A. F. Gas-phase treatment of polyethylene terephthalate waste in nitrating atmosphere for recycling purposes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 400, p. 123268, dez. 2020.

KUSUMOCAHYO, S. P. *et al.* Utilization of used polyethylene terephthalate (PET) bottles for the development of ultrafiltration membrane. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 6, p. 104381, dez. 2020.

KYUNG HAN, L. *et al.* **Method for chemical recycling of glycol modified polyethylene terephthalate wastes**. Korea, 2018.

LAGAE-CAPELLE, E. *et al.* Combining Organic and Inorganic Wastes to Form Metal–Organic Frameworks. **Materials**, v. 13, n. 2, p. 441, 17 jan. 2020.

LAKEEV, S. N.; ISHALINA, O. V.; MINNIGULOV, R. Z. **Method for waste pet alkaline hydrolysis with terephthalic acid production**. Russian, 2017.

LE CARRE LATIN. **Usos do plástico em medicina**. Disponível em: <https://lecarrelatin.com/pt/usos-do-plastico-em-medicina/>. Acesso em: 24 fev. 2022.

LE, D. K. *et al.* Applications of functionalized polyethylene terephthalate aerogels from plastic bottle waste. **Waste Management**, v. 100, p. 296–305, dez. 2019.

LE, D. K. *et al.* Methyltrimethoxysilane-coated recycled polyethylene terephthalate aerogels for oil spill cleaning applications. **Materials Chemistry and Physics**, v. 239, p. 122064, jan. 2020.

LEE, J. *et al.* Enhanced energy recovery from polyethylene terephthalate via pyrolysis in CO₂ atmosphere while suppressing acidic chemical species. **Energy Conversion and Management**, v. 148, p. 456–460, set. 2017.

LEE, M. S. *et al.* **Method for producing dioctylterephthalate and antifreeze simultaneously by using polyethyleneterephthalate.** Korea, 2020.

LEE, R. P.; TSCHOEPE, M.; VOSS, R. Perception of chemical recycling and its role in the transition towards a circular carbon economy: A case study in Germany. **Waste Management**, v. 125, p. 280–292, abr. 2021.

LEE, S.; PARK, Y. Customization of technology roadmaps according to roadmapping purposes: Overall process and detailed modules. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 72, n. 5, p. 567–583, jun. 2005.

LENG, Z.; PADHAN, R. K.; SREERAM, A. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 682–688, abr. 2018.

LETTIERI, P.; AL-SALEM, S. M. Chapter 17 - Thermochemical Treatment of Plastic Solid Waste. In: **Waste: a handbook for management**. [S.l: s.n.], 2011.

LIN, S. *et al.* **Method for preparing fiber-grade polyester chip capable of being applied to processing of textile from waste braided fabric.** China, 2017.

LIU, B. *et al.* Ultrafast Homogeneous Glycolysis of Waste Polyethylene Terephthalate via a Dissolution-Degradation Strategy. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 57, n. 48, p. 16239–16245, 5 dez. 2018.

LIU, G. *et al.* An emergy-LCA analysis of municipal solid waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, 2017a.

LIU, Q. *et al.* Recycling and reuse of waste artificial turf via solid-state shear milling technology. **RSC Advances**, v. 7, n. 85, p. 54117–54127, 2017b.

LIU, X. *et al.* Co-etching effect to convert waste polyethylene terephthalate into hierarchical porous carbon toward excellent capacitive energy storage. **Science of The Total Environment**, v. 723, p. 138055, jun. 2020.

LUIZ, F. N. *et al.* Thermal Evaluation by DSC and Tensile Strength of Extrudated Blends from Polyethylene Terephthalate and Kraft Lignin. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 1, p. 367–373, 15 jan. 2020.

MA, Y. *et al.* Eco-friendly Waterborne Alkyd Resin from Polyethylene Terephthalate Waste. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 3, p. 1083–1094, 3 mar. 2020.

MANISHA; SINGH, N. Investigating strength and properties of ecoladrillo: eco bricks. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, n. 7, p. 134–142, 2017.

MARIA NUNES MORAES, F.; LUIS PEREIRA NUNES, M. **100% recycled pet continuous synthetic fiber blanket.** Brazil, 2017.

MARQUES, D. V. *et al.* Recycled polyethylene terephthalate-based boards for thermal-acoustic insulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 251–262, jul. 2018.

MARQUES, D. V. *et al.* Recycled polyethylene terephthalate and aluminum anodizing sludge-based boards with flame resistance. **Waste Management**, v. 92, p. 1–14, jun. 2019.

MAURYA, A.; BHATTACHARYA, A.; KHARE, S. K. Enzymatic Remediation of Polyethylene Terephthalate (PET)–Based Polymers for Effective Management of Plastic Wastes: An Overview. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, 19 nov. 2020.

MEAWAD, A.; IBRAHIM, S. Novel bifunctional dispersing agents from waste PET packaging materials and interaction with cement. **Waste Management**, v. 85, p. 563–573, fev. 2019.

MEISSNER, D.; GOKHBERG, L.; SOKOLOV, A. (eds.). **Science, Technology and Innovation Policy for the Future**. Berlin: Springer, 2013.

MELO FILHO, L. D. R. DE. **Abordagem de roadmapping na geração de diretrizes de inovação para conglomerados industriais**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

MISHRA, B.; KUMAR GUPTA, M. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 95–107, nov. 2018.

MISHRA, R. K.; SAHOO, A.; MOHANTY, K. Pyrolysis kinetics and synergistic effect in co-pyrolysis of Samanea saman seeds and polyethylene terephthalate using thermogravimetric analyser. **Bioresource Technology**, v. 289, p. 121608, out. 2019.

MITTAL, V. **High Performance Polymers and Engineering Plastics**. [S.l.] John Wiley & Sons, 2011.

MOHAMMED, M. K.; AL-HADITHI, A. I.; MOHAMMED, M. H. Production and optimization of eco-efficient self compacting concrete SCC with limestone and PET. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 734–746, fev. 2019.

MOHSIN, M. A. *et al.* Sodium Methoxide Catalyzed Depolymerization of Waste Polyethylene Terephthalate Under Microwave Irradiation. **Catalysis in Industry**, v. 10, n. 1, p. 41–48, 4 jan. 2018.

MONSIGNY, L.; BERTHET, J.-C.; CANTAT, T. Depolymerization of Waste Plastics to Monomers and Chemicals Using a Hydrosilylation Strategy Facilitated by Brookhart's Iridium(III) Catalyst. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 8, p. 10481–10488, 6 ago. 2018.

MONTE, G. **Process for the production of glycol-modified polyethylene terephthalate from recycled raw materials**. Italy, 2018.

MOOG, D. *et al.* Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation. **Microbial Cell Factories**, v. 18, n. 1, p. 171, 10 dez. 2019.

MORATO, M.; FIGUEIREDO, R.; PAIVA, C. **Arboviroses**. BrazilCanal Saúde Fiocruz, , 2017. Disponível em: <http://www.canal.fiocruz.br/video/index.php?v=arboviroses1les1-1924>. Acesso em: 11 mar. 2022

MUSALE, R. M.; SHUKLA, S. R. Deep eutectic solvent as effective catalyst for aminolysis of polyethylene terephthalate (PET) waste. **International Journal of Plastics Technology**, v. 20, n. 1, p. 106–120, 5 jun. 2016.

NABGAN, W. *et al.* Exploration of reaction mechanisms on the plastic waste polyethylene terephthalate (PET) dissolved in phenol steam reforming reaction to produce hydrogen and valuable liquid fuels. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 150, p. 104860, set. 2020.

NEUMANN, F. *Technology Roadmap: propilenoglicol com base em fontes renováveis*. 2010. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biocombustíveis e Petroquímica) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

NGADIMAN, N. *et al.* Panel Board From Coconut Fibre And Pet Bottle. **E3S Web of Conferences**, v. 34, p. 01014, 19 mar. 2018.

NIKBIN, I. M. *et al.* Fracture parameters assessment of lightweight concrete containing waste polyethylene terephthalate by means of SEM and BEM methods. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 107, p. 102518, jun. 2020.

NIKBIN, IMAN. M.; AHMADI, H. Fracture behaviour of concrete containing waste tire and waste polyethylene terephthalate: An sustainable fracture design. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 119960, nov. 2020.

NIKSIAR, A.; FARAMARZI, A. H.; SOHRABI, M. Kinetic study of polyethylene terephthalate (PET) pyrolysis in a spouted bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 113, p. 419–425, maio 2015.

NIZAMUDDIN, S. *et al.* An overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1289–1299, jun. 2017.

NOMURA, K. *et al.* Multiblock Copolymers for Recycling Polyethylene–Poly(ethylene terephthalate) Mixed Waste. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 12, n. 8, p. 9726–9735, 26 fev. 2020.

NÚCLEO DE ESTUDOS INDUSTRIAIS E TECNOLÓGICOS. **Elaboração de 10 Roadmaps Tecnológicos: Adesivos, Tintas, Polímeros, BioMateriais, Automação, Robótica, Tintas Sustentáveis e Inteligentes, Elastômeros e Compósitos**. Disponível em: <http://www.neitec.eq.ufrrj.br/projetos/2015-elaboracao-de-10-roadmaps-tecnologicos-adesivos-tintas-polimeros-biomateriais-automacao->

robotica-tintas-sustentaveis-e-inteligentes-elastomeros-e-compositos/. Acesso em: 19 ago. 2022.

OHMURA, S. D. *et al.* Depolymerization of Waste PET with Phosphoric Acid-Modified Silica Gel Under Microwave Irradiation. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 25, n. 2, p. 250–257, 10 jun. 2017.

OLAM, M.; KARACA, H. Effect of Sodium Boron Hydride (NaBH₄) on Waste Polyethylene Terephthalate Pyrolysis. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 362, n. 1, p. 012032, 1 nov. 2019.

OSMAN, A. I. *et al.* Pyrolysis kinetic modelling of abundant plastic waste (PET) and in-situ emission monitoring. **Environmental Sciences Europe**, v. 32, n. 1, p. 112, 31 dez. 2020.

OSORIO, J.; GARRISH, E. **Inks for recyclable plastics**. France, 2021.

PADHAN, R. K. *et al.* Rheological evaluation of bitumen modified using antistripping additives synthesised from waste polyethylene terephthalate (PET). **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 9, p. 1083–1091, 28 jul. 2020.

PADHAN, R. K.; GUPTA, A. A. Preparation and evaluation of waste PET derived polyurethane polymer modified bitumen through in situ polymerization reaction. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 337–345, jan. 2018.

PANASYUK, G. P. *et al.* New methods for utilization of waste polyethylene terephthalate. **Theoretical Foundations of Chemical Engineering**, v. 49, n. 4, p. 580–583, 16 jul. 2015.

PARK, C. *et al.* Pyrolysis of Polyethylene Terephthalate over Carbon-Supported Pd Catalyst. **Catalysts**, v. 10, n. 5, p. 496, 1 maio 2020.

PARK, R.; SRIDHAR, V.; PARK, H. Taguchi method for optimization of reaction conditions in microwave glycolysis of waste PET. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 3, p. 664–672, 24 maio 2020.

PARKER, L. The world's plastic pollution crisis explained. **National geographic**, 2019.

PARROTT, M. **Chemical recycling of polyethylene terephthalate by microwave irradiation**. United States of America, 2018.

PARROTT, M. **Chemical recycling of polyethylene terephthalate by microwave irradiation**. United States of America, 2020.

PAVÓN VARGAS, C. P. *et al.* **Procedure for obtaining a recycled material from multilayer pet containers and recycled material obtained with the same**. Spain, 2021.

PENG, J. *et al.* **Method for preparing regenerated polyester by efficiently alcoholysis of waste polyester**. [s.n.]. China, 2021.

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R. **Characterisation of technology roadmaps: purpose and format**. PICMET '01. Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. Proceedings Vol.1: Book of Summaries (IEEE Cat. No.01CH37199). **Anais...PICMET - Portland State Univ**, 2001.

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R. Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 71, n. 1–2, p. 5–26, jan. 2004.

PÓŁROLNICZAK, P. *et al.* Composite sulfur cathode for Li-S batteries comprising hierarchical carbon obtained from waste PET bottles. **Synthetic Metals**, v. 261, p. 116305, mar. 2020.

PROBERT, D.; RADNOR, M. Frontier Experiences from Industry-Academia Consortia. **Research-Technology Management**, v. 46, n. 2, p. 27–30, 26 mar. 2003.

RADHAKRISHNAN, S. Environmental Implications of Reuse and Recycling of Packaging. In: **Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes**. [S.l: s.n.], 2016

RAHIMI R., S. *et al.* Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 166–177, jul. 2016.

RAHMAWATI, I. *et al.* The adsorption of dye waste using black carbon from polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle waste. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1321, n. 2, p. 022011, 1 out. 2019.

RAI, P.; SINGH, K. P. Valorization of Poly (ethylene) terephthalate (PET) wastes into magnetic carbon for adsorption of antibiotic from water: Characterization and application. **Journal of Environmental Management**, v. 207, p. 249–261, fev. 2018.

RAJENDRAN, S. *et al.* Mechanical Performance Studies on Composites Using Polyethylene Terephthalate Char Derived from Polyethylene Terephthalate Waste Bottle–Reinforced Polyester Composites. **Materials Performance and Characterization**, v. 9, n. 1, p. 20190066, 1 jan. 2020.

RAKHMATULLINA, A. P. *et al.* New Complex Epoxy Ester Resin-Based Binder: Synthesis and Influence on the Curing Process of Epoxyamine Compositions. **Russian Journal of Applied Chemistry**, v. 93, n. 2, p. 182–187, 6 fev. 2020.

REN, J. *et al.* Green synthesis of chromium-based metal-organic framework (Cr-MOF) from waste polyethylene terephthalate (PET) bottles for hydrogen storage applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 40, p. 18141–18146, out. 2016.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Plastic Pollution. **Our World in Data**, [S.l: s.n.], 2018.

SADRMOMTAZI, A. *et al.* The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2363–2373, jan. 2016.

SAMAK, N. A. *et al.* Recent advances in biocatalysts engineering for polyethylene terephthalate plastic waste green recycling. **Environment International**, v. 145, p. 106144, dez. 2020.

SELVARAJ, V.; RAGHAVARSHINI, T. R.; ALAGAR, M. Development of *Prosopis juliflora* carbon-reinforced PET bottle waste-based epoxy-blended bio-phenolic benzoxazine composites for advanced applications. **RSC Advances**, v. 10, n. 10, p. 5656–5665, 2020.

SENTHIL RAJA, D. *et al.* Synthesis of mixed ligand and pillared paddlewheel MOFs using waste polyethylene terephthalate material as sustainable ligand source. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 231, p. 186–191, set. 2016.

SEO, S. W. *et al.* Micropore-structured activated carbon prepared by waste PET/petroleum-based pitch. **Carbon Letters**, v. 29, n. 4, p. 385–392, 13 ago. 2019.

SHAHIDAN, S. Concrete Incorporated with Optimum Percentages of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle Fiber. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 10, n. 1, 1 abr. 2018.

SHIRAZIMOOGHADDAM, S. *et al.* Chemical Recycling of Used PET by Glycolysis Using Niobia-Based Catalysts. **ACS Engineering Au**, v. 3, n. 1, p. 37–44, 15 fev. 2023.

SIKDAR, S.; SIDDAIAH, A.; MENEZES, P. L. Conversion of Waste Plastic to Oils for Tribological Applications. **Lubricants**, v. 8, n. 8, p. 78, 22 jul. 2020.

SILVA FREITAS, F. L. *et al.* Evaluation of the effect of additives on thermo-oxidative and hydrolytic stabilization of recycled post-consumer poly (ethylene terephthalate) using Design of Experiments. **Polymer Testing**, v. 81, p. 106275, jan. 2020.

SINGH, A.; KUMARI, K.; KUNDU, P. P. Extrusion and Evaluation of Chitosan Assisted AgNPs Immobilized Film Derived from Waste Polyethylene Terephthalate for Food Packaging Applications. **Journal of Packaging Technology and Research**, v. 1, n. 3, p. 165–180, 28 out. 2017.

SINGH, R. K. *et al.* Thermal degradation of waste plastics under non-sweeping atmosphere: Part 1: Effect of temperature, product optimization, and degradation mechanism. **Journal of Environmental Management**, v. 239, p. 395–406, jun. 2019.

SINGH, R. K. *et al.* Conventional pyrolysis of Plastic waste for Product recovery and utilization of pyrolytic gases for carbon nanotubes production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 14, p. 20007–20016, 11 mar. 2022.

SOARES, L. E. **Aproveitamento Energético No Brasil** : Eficiência Energética E Análise De Potencialidades Futuras Lavras-Mg. [S.l.]: Universidade Federal de Lavras, 2013.

SOARES, L. E. B. **Impactos ambientais ocasionados por polímeros sintéticos e importância da educação ambiental nesse contexto**: uma revisão bibliográfica. [S.l.]: Realize, 2019.

SOLIS, M.; SILVEIRA, S. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. **Waste Management**, v. 105, p. 128–138, mar. 2020.

SPÓSITO, F. A. *et al.* Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101506, nov. 2020.

ŠRÁMEK, J.; TRZEWICZEK, M.; TRÁVNÍČEK, K. **A method of producing terephthalic acid from waste polyethylene terephthalate**. Czech Republic, 2019.

STANHOPE, B.; ZEHNER, B. E.; BUHRST, B. K. **Use of recycled packaging in polymer composite products**. United States of America, 2018.

STEPANOV, V. V.; STEPANOVA, O. V. **Complex method of producing composite sleepers by processing wood and polymer wastes**. Russian, 2019.

STRELNIKOV, V. V. *et al.* **Composite material based on secondary polyethylene terephthalate**. Russian, 2021.

SUH DONG EUN; LEE DO YOUNG; JINHUA CHENG. **Novel microorganism with plastic-degrading activity and use thereof**. Korea, 2018.

SUN, C. *et al.* Recycling and depolymerization of waste polyethylene terephthalate bottles by alcohol alkali hydrolysis. **Journal of Central South University**, v. 25, n. 3, p. 543–549, 18 mar. 2018a.

SUN, J. *et al.* Solubilization and Upgrading of High Polyethylene Terephthalate Loadings in a Low-Costing Bifunctional Ionic Liquid. **ChemSusChem**, v. 11, n. 4, p. 781–792, 22 fev. 2018b.

SYAMMAUN, T.; MEILLYTA; YATI, R. Effect of coconut-shell ash as filler and plastic bottle as substitution of porous asphalt mixture. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 821, n. 1, p. 012015, 1 abr. 2020.

TAHERKHANI, H.; ARSHADI, M. R. Investigating the mechanical properties of asphalt concrete containing waste polyethylene terephthalate. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. 2, p. 381–398, 17 fev. 2019.

TEPLITSKY, A.; DZYURA, E. A. **Method of obtaining carbon-containing material from recyclable tires and/or rubber products**. China, 2020.

THI LE BUI, T. *et al.* Using ionic liquid catalyst for conversion of waste polyethylene terephthalate and soybean oil to polyester polyol. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 37, 5 out. 2016.

THINON, O.; GAUTHIER, T. **A method of producing a polyester terephthalate from a monomer mixture comprising a diester**. France, 2020.

THINON, O.; GAUTHIER, T. **Process for the production of a polyester terephthalate incorporating a depolymerization process**. France, 2021.

TJARONGE, M. W. *et al.* Preliminary Study on Compressive Strength of Porous Asphalt Containing Modified Buton Asphalt, Waste Plastic and Limestone Powder. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 875, n. 1, p. 012032, 1 jun. 2020.

TOROYAN, R. A.; AVAGIMYAN, A. V. **Method for manufacturing heat and sound insulating construction material**. Russian, 2018.

UBAIDULLAH, M. *et al.* Waste PET plastic derived ZnO@NMC nanocomposite via MOF-5 construction for hydrogen and oxygen evolution reactions. **Journal of King Saud University - Science**, v. 32, n. 4, p. 2397–2405, jun. 2020.

USMAN, N. *et al.* Reinforcement of Asphalt Concrete Mixture using Recycle Polyethylene Terephthalate Fibre. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 46, 26 dez. 2016.

USMAN, N. *et al.* The Use of Plastic Fiber for Minimizing Stripping Potential of Bituminous Mixture. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 10, n. 9, 1 dez. 2018.

VALDMAA, A.; KÄSNAR, A.; SAAREVÄLI, A. **Polymer composition from mixed plastic waste**. United States of America, 2016.

VIEIRA, S. M. DE M. *et al.* Physicochemical Properties of a Solid Fuel from Biomass of Elephant Grass Charcoal (*Pennisetum purpureum* Schum.) and Recyclable PET and HDPE. **Materials Research**, v. 23, n. 4, 2020.

WANG, J. *et al.* Waste polyethylene terephthalate (PET) plastics-derived activated carbon for CO₂ capture: a route to a closed carbon loop. **Green Chemistry**, v. 22, n. 20, p. 6836–6845, 2020.

WANG, L. *et al.* **Recycling system for chemical recycling method of waste PET materials**. China, 2016.

WANG LINCONG. **Method for preparing dioctyl terephthalate by using polyethylene terephthalate waste**. China, 2017.

WANG, Y. *et al.* Zinc-catalyzed ester bond cleavage: Chemical degradation of polyethylene terephthalate. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 1469–1475, jan. 2019.

Waste Incineration and Public Health. [S.l: s.n.], 2000

WEI, R.; ZIMMERMANN, W. Biocatalysis as a green route for recycling the recalcitrant plastic polyethylene terephthalate. **Microbial Biotechnology**, v. 10, n. 6, p. 1302–1307, 12 nov. 2017.

WEI, S.; KAMALI, A. R. Dual-step air-thermal treatment for facile conversion of PET into porous carbon particles with enhanced dye adsorption performance. **Diamond and Related Materials**, v. 107, p. 107914, ago. 2020.

WEI, Z. *et al.* Fabrication of self-reinforced polyester composites and their mechanical and flame retardant properties. **Advances in Polymer Technology**, v. 37, n. 7, p. 2436–2445, nov. 2018.

WEN, Y. *et al.* Mass production of hierarchically porous carbon nanosheets by carbonizing “real-world” mixed waste plastics toward excellent-performance supercapacitors. **Waste Management**, v. 87, p. 691–700, mar. 2019.

WEN, Y. *et al.* Porous carbon nanosheet with high surface area derived from waste poly(ethylene terephthalate) for supercapacitor applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 5, p. 48338, 5 fev. 2020.

WENLONG, Y. *et al.* Highly dispersed Pt catalyst supported on nanoporous carbon derived from waste PET bottles for reductive alkylation. **RSC Advances**, v. 9, n. 53, p. 31092–31101, 2019.

WIPO. **What is a patent?** Disponível em: <https://www.wipo.int/patents/en/#>. Acesso em: 6 nov. 2022.

WU, J. *et al.* **Stenotrophomonas maltophilia capable of degrading polyethylene glycol terephthalate**. China, 2020.

YONGSHENG, H. *et al.* **Preparation method of 1, 3-cyclohexanedione**. China, 2022.

YUAN, X. *et al.* Solving two environmental issues simultaneously: Waste polyethylene terephthalate plastic bottle-derived microporous carbons for capturing CO₂. **Chemical Engineering Journal**, v. 397, p. 125350, out. 2020a.

YUAN, X. *et al.* Upcycling of waste polyethylene terephthalate plastic bottles into porous carbon for CF₄ adsorption. **Environmental Pollution**, v. 265, p. 114868, out. 2020b.

YUAN, X. *et al.* Valorization of waste polyethylene terephthalate plastic into N-doped microporous carbon for CO₂ capture through a one-pot synthesis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 399, p. 123010, nov. 2020c.

YUN, X. *et al.* Preparation and characterization of waterborne alkyd-amino baking coatings based on waste polyethylene terephthalate. **Royal Society Open Science**, v. 7, n. 1, p. 191447, 15 jan. 2020.

ZHANG, F. *et al.* Waste PET as a Reactant for Lanthanide MOF Synthesis and Application in Sensing of Picric Acid. **Polymers**, v. 11, n. 12, p. 2015, 5 dez. 2019.

ZHOU, X. *et al.* Synthesis and characterization of waterborne polyurethane dispersion from glycolized products of waste polyethylene terephthalate used as soft and hard segment. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 74, p. 49–56, abr. 2017.

ZHOU, X. *et al.* Facile preparation and characterization of fibrous carbon nanomaterial from waste polyethylene terephthalate. **Waste Management**, v. 107, p. 172–181, abr. 2020.

ZIARI, H.; KALIJI, A. G.; BABAGOLI, R. Laboratory evaluation of the effect of waste plastic bottle (PET) on rutting performance of hot mix asphalt mixtures. **Petroleum Science and Technology**, v. 34, n. 9, p. 819–823, 2 maio 2016.

ZIMMERMANN, W. Biocatalytic recycling of polyethylene terephthalate plastic. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 378, n. 2176, p. 20190273, 24 jul. 2020.

ZUO, H.; WANG, S. **PET plate recycling and reprocessing system**. China, 2020.

ПИЗАЕВ, Э. Г. **Polymer-rubber composition and method of production thereof**. Eurasian: Eurasian Patent Organization, 2017.

СТЕПАНОВ, В. В. *et al.* **Method for processing wood and thermopolymer waste and manufacturing of railway sleepers**. Russian, 2016.

ANEXO A – Artigos científicos usados no trabalho como referência para prospecção tecnológica

 Tabela 3 – Lista dos artigos científicos considerada para elaboração do *technology roadmap* (continua)

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Co-etching effect to convert waste polyethylene terephthalate into hierarchical porous carbon toward excellent capacitive energy storage	2020	Polônia	PET	Química	Carbonização
Multiblock Copolymers for Recycling Polyethylene–Poly(ethylene terephthalate) Mixed Waste	2020	Estados Unidos	PET e PE	Química	Reação de Acoplamento
Porous carbon nanosheet with high surface area derived from waste poly(ethylene terephthalate) for supercapacitor applications	2020	Polônia	PET e montmorilonita organicamente modificada	Química	Carbonização
Co-processing of common plastics with pistachio hulls via hydrothermal liquefaction	2020	Reino Unido	PE, PET, PP e nylon-6	Química	Liquefação
Conversion of waste plastic to oils for tribological applications	2020	Estados Unidos	PET	Química	Pirólise
Combining organic and inorganic wastes to form metal-organic frameworks	2020	França	PET	Química	Despolimerização
Conventional pyrolysis of Plastic waste for Product recovery and utilization of pyrolytic gases for carbon nanotubes production	2020	Índia	Resíduo Plástico (PE, PP, PET, PS e outros)	Química	Pirólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Investigating strength and properties of ecoladrillo: Eco bricks	2017	Índia	PET	Mecânica	Sem adição de calor
Recycling and reuse of waste artificial turf via solid-state shear milling technology	2017	China	PE, PP, PET, Poliacrilato e preenchimento inorgânico	Mecânica	Com adição de calor
Thermoplastic composites between polybutylene succinate and recycled PET adding hollow glass microspheres	2018	Tailândia	Poli(succinato de butileno) (PSB), PET e Microesferas de vidro	Mecânica	Com adição de calor
Sustainable design of flexible 3D aerogel from waste PET bottle for wastewater treatment to energy harvesting device	2020	Coréia do Sul	PET	Química	Eletrospinning
Fabrication of self-reinforced polyester composites and their mechanical and flame retardant properties	2018	Coréia do Sul	PET e Polibutileno Tereftalato (PBT)	Mecânica	Sem adição de calor
Mass production of hierarchically porous carbon nanosheets by carbonizing “real-world” mixed waste plastics toward excellent-performance supercapacitors	2019	Polônia	PE, PET, PP, PS e PVC	Química	Carbonização
Structure and thermal properties of various alcoholysis products from waste poly(ethylene terephthalate)	2019	China	PET	Química	Alcoólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Panel Board from Coconut Fibre and Pet Bottle	2018	Malásia	PET e Fibra de coco	Mecânica	Sem adição de calor
The use of plastic fiber for minimizing stripping potential of bituminous mixture	2018	Nigéria	PET	Mecânica	Sem adição de calor
Concrete incorporated with optimum percentages of recycled polyethylene terephthalate (PET) bottle fiber	2018	Malásia	PET	Mecânica	Sem adição de calor
Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures	2019	Egito	PET	Mecânica	Com adição de calor
Depolymerization of Waste Plastics to Monomers and Chemicals Using a Hydrosilylation Strategy Facilitated by Brookhart's Iridium(III) Catalyst	2018	França	PET, PCL, PLA, e policarbonatos	Química	Despolimerização
Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt	2018	Hong Kong	PET	Química	Aminólise
Synthesis of PET-PLA copolymer from recycle plastic bottle and study of its applications in the electrochromic devices with graphene conductive ink	2018	Tailândia	PET, L- Ácido Láctico (LAL) e Tinta condutora de grafeno	Química	Despolimerização
Processing of mixed-plastic waste to fuel oil, carbon nanotubes and hydrogen using multi-core reactor	2017	Índia	PEAD, PP, PS, PVC e PET	Química	Pirólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete	2016	Iran	PET	Mecânica	Sem adição de calor
Environmentally benign conversion of waste polyethylene terephthalate to fluorescent carbon dots for “on-off-on” sensing of ferric and pyrophosphate ions	2019	China	Resíduo PET	Mecânica	Sem adição de calor
Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review	2019	Malásia	Resíduos de PET	Química	Alcoólise Hidrólise Aminólise Glicólise
Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation	2019	Alemanha	Resíduo PET	Quaternária	Degradação Biológica
Green synthesis of chromium-based metal-organic framework (Cr-MOF) from waste polyethylene terephthalate (PET) bottles for hydrogen storage applications	2016	África do Sul	Resíduos de PET	Química	Despolimerização
Porous carbons derived from polyethylene terephthalate (PET) waste for CO2 capture studies	2019	Índia	Resíduos de PET	Química	Carbonização
Solving two environmental issues simultaneously: Waste polyethylene terephthalate plastic bottle-derived microporous carbons for capturing	2020	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Carbonização

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
CO2					
Enzymatic Remediation of Polyethylene Terephthalate (PET)-Based Polymers for Effective Management of Plastic Wastes: An Overview	2020	França	Resíduos de PET	Química	Hidrólise
Recent advances in biocatalysts engineering for polyethylene terephthalate plastic waste green recycling	2020	China	Resíduo PET	Quaternária	Degradação Biológica
Upcycling of waste polyethylene terephthalate plastic bottles into porous carbon for CF4 adsorption	2020	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Carbonização
Waste polyethylene terephthalate (PET) plastics-derived activated carbon for CO2 capture: a route to a closed carbon loop	2020	China	Garrafas PET	Química	Carbonização
Valorization of waste polyethylene terephthalate plastic into N-doped microporous carbon for CO2 capture through a one-pot synthesis	2020	Coreia do Sul	Resíduos de PET	Química	Carbonização

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis	2016	Índia	misturas plásticas (PEAD, PP e PET)	Química	Pirólise
Processing of recycled waste PET (polyethylene terephthalate) plastics bottle into for the lightweight and reinforcement bricks	2019	Indonésia	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack	2016	Iran	Waste dirty PET and recycled tire rubber	Mecânica	Sem adição de calor
Solubilization and Upgrading of High Polyethylene Terephthalate Loadings in a Low-Costing Bifunctional Ionic Liquid	2018	Estados Unidos	PET	Química	Glicólise
Functional expression of polyethylene terephthalate-degrading enzyme (PETase) in green microalgae	2020	Coréia do Sul	Garrafas PET	Quaternária	Degradação Biológica

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Exploration of reaction mechanisms on the plastic waste polyethylene terephthalate (PET) dissolved in phenol steam reforming reaction to produce hydrogen and valuable liquid fuels	2020	Malásia	Garrafas PET Fenol	Química	Pirólise
Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate: A Mini-Review	2018	India	Resíduo PET	Quaternária	Degradação Biológica
Utilization of used polyethylene terephthalate (PET) bottles for the development of ultrafiltration membrane	2020	Indonésia	Garrafas PET	Química	Despolimerização
Methyltrimethoxysilane-coated recycled polyethylene terephthalate aerogels for oil spill cleaning applications	2020	Cingapura	Resíduos de garrafas plásticas, álcool polivinílico (PVA) e glutaraldeído (GA)	Química	Despolimerização
Facile preparation and characterization of fibrous carbon nanomaterial from waste polyethylene terephthalate	2020	China	Resíduos de garrafas PET, neopentilglicol e dipropilenoglicol	Química	Glicólise
A Novel One Step Synthesis for Carbon Based Nanomaterials from Polyethyleneterephthalate (PET) Bottles Waste	2017	Egito	Garrafas PET	Química	Carbonização

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Performance of composite sand cement brick containing recycle concrete aggregate and waste polyethylene terephthalate with different mix design ratio	2018	Malásia	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
ZnO nanodispersion as pseudohomogeneous catalyst for alcoholysis of polyethylene terephthalate	2020	China	Resíduos PET	Química	Metanólise
Molten salt conversion of polyethylene terephthalate waste into graphene nanostructures with high surface area and ultra-high electrical conductivity	2019	China	Garrafas PET	Química	Carbonização
Polyethylene Terephthalate Deconstruction Catalyzed by a Carbon-Supported Single-Site Molybdenum-Dioxo Complex	2020	Estados Unidos	Resíduos de Garrafas PET ou uma mistura PET + PP	Química	Despolimerização
Current State and Perspectives Related to the Polyethylene Terephthalate Hydrolases Available for Biorecycling	2020	Japão	Resíduos PET	Química	Hidrólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Performance evaluation of binders and Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures modified by Ground Tire Rubber (GTR), waste Polyethylene Terephthalate (PET) and Anti Stripping Agents (ASAs)	2020	Iran	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Experimental investigation on gasification characteristics of polyethylene terephthalate (PET) microplastics in supercritical water	2020	China	Resíduos PET	Química	Gasificação
Microbial Polyethylene Terephthalate Hydrolases: Current and Future Perspectives	2020	Irlanda	Resíduos PET	Química	Hidrólise
Applications of functionalized polyethylene terephthalate aerogels from plastic bottle waste	2019	Cingapura	Resíduos PET	Química	Despolimerização
High-pressure synthesis of microdiamonds from polyethylene terephthalate	2018	Rússia	Garrafas PET	Química	Carbonização
Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate	2016	Egito	Resíduos PET	Química	Hidrólise Aminólise Metanólise Glicólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Conversion of polyethylene terephthalate plastic waste and phenol steam reforming to hydrogen and valuable liquid fuel: Synthesis effect of NieCo/ZrO ₂ nanostructured catalysts	2020	Malásia	Garrafas PET	Química	Reforma a vapor
Effect of hydrolysis products on the enzymatic degradation of polyethylene terephthalate nanoparticles by a polyester hydrolase from <i>Thermobifida fusca</i>	2015	Alemanha	Resíduos PET	Química	Hidrólise
Eco-friendly Waterborne Alkyd Resin from Polyethylene Terephthalate Waste	2020	China	Garrafas PET	Química	Glicólise
Enhanced energy recovery from polyethylene terephthalate via pyrolysis in CO ₂ atmosphere while suppressing acidic chemical species	2017	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Pirólise
Fracture behaviour of concrete containing waste tire and waste polyethylene terephthalate: An sustainable fracture design	2020	Iran	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Synthesis of magnetic porous carbon composite derived from metal-organic framework using recovered terephthalic acid from polyethylene terephthalate (PET) waste bottles as organic ligand and its potential as adsorbent for antibiotic tetracycline hydrochloride	2020	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Hidrólise
Kinetic Study of Polyethylene Terephthalate (PET) Pyrolysis in a Spouted Bed Reactor	2015	Irã	Garrafas PET	Química	Pirólise
Ultrafast Homogeneous Glycolysis of Waste Polyethylene Terephthalate via a Dissolution-Degradation Strategy	2018	China	Resíduos PET	Química	Glicólise
Rheological evaluation of bitumen modified using antistripping additives synthesised from waste polyethylene terephthalate (PET)	2020	Hong Kong	Garrafas PET	Química	Aminólise
Biocatalytic recycling of polyethylene terephthalate plastic	2020	Alemanha	Garrafas PET	Quaternária	Degradação Biológica

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Mechanical Performance Studies on Composites Using Polyethylene Terephthalate Char Derived from Polyethylene Terephthalate Waste Bottle-Reinforced Polyester Composites	2020	Índia	Garrafas PET	Química	Pirólise
Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement	2018	India	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
Pyrolysis of Polyethylene Terephthalate over Carbon-Supported Pd Catalyst	2020	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Pirólise
Zinc-catalyzed ester bond cleavage: Chemical degradation of polyethylene terephthalate	2019	China	Garrafas PET	Química	Despolimerização
Gas-phase treatment of polyethylene terephthalate waste in nitrating atmosphere for recycling purposes	2020	Rússia	Garrafas PET	Química	Hidrólise
Deep eutectic solvent as effective catalyst for aminolysis of polyethylene terephthalate (PET) waste	2016	Índia	Garrafas PET	Química	Aminólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Ni/Pd-promoted Al ₂ O ₃ –La ₂ O ₃ catalyst for hydrogen production from polyethylene terephthalate waste via steam reforming	2017	Malásia	Garrafas PET	Química	Reforma a vapor
Biocatalysis as a green route for recycling the recalcitrant plastic polyethylene terephthalate	2017	Alemanha	Garrafas PET	Quaternária	Degradação Biológica
Pyrolysis kinetics and synergistic effect in co-pyrolysis of Samanea saman seeds and polyethylene terephthalate using thermogravimetric analyser	2019	Índia	Garrafas PET	Química	Pirólise
Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET)	2020	Iran	PET	Mecânica	Sem adição de calor
The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation	2016	Iran	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
The adsorption of dye waste using black carbon from polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle waste	2019	Indonésia	Garrafas PET	Química	Carbonização

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Recycled polyethylene terephthalate-based boards for thermal-acoustic insulation	2018	Brasil	Resíduos PET	Química	Despolimerização
Recycled polyethylene terephthalate and aluminum anodizing sludge-based boards with flame resistance	2019	Brasil	PET	Química	Despolimerização
Ionic Liquid Potential to Recycle Polymeric Waste: An Experimental Investigation	2020	Argélia	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Thermal Evaluation by DSC and Tensile Strength of Extrudated Blends from Polyethylene Terephthalate and Kraft Lignin	2020	Brasil	Amostras PET pré-consumo	Mecânica	Com adição de calor
Lipase from <i>Candida antarctica</i> (CALB) and cutinase from <i>Humicola insolens</i> act synergistically for PET hydrolysis to terephthalic acid	2017	Brasil	Garrafas PET	Química	Hidrólise
Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime	2020	Brasil	Resíduos PET (gerados como subproduto industrial)	Mecânica	Sem adição de calor

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Evaluation of the effect of additives on thermo-oxidative and hydrolytic stabilization of recycled post-consumer poly (ethylene terephthalate) using Design of Experiments	2020	Brasil	Flocos PET (obtidos de garrafas transparentes pós-consumo fornecidas pela Unnafibras)	Mecânica	Com adição de calor
High-fold improvement of assorted post-consumer poly(ethylene terephthalate) (PET) packages hydrolysis using Humicola insolens cutinase as a single biocatalyst	2019	Brasil	Embalagens PET sortidas	Química	Hidrólise
Cellulose Associated with Pet Bottle Waste in Cement Based Composites	2017	Brasil	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Physicochemical Properties of a Solid Fuel from Biomass of Elephant Grass Charcoal (Pennisetum purpureum Schum.) and Recyclable PET and HDPE	2020	Brasil	termoplásticos recicláveis em pó (PET e PEAD)	Mecânica	Sem adição de calor
A composite of polyethylene terephthalate and sugarcane ash-coated FeSO ₄ .7H ₂ O (PETSCA/Fe) as a low-cost adsorbent material	2017	Brasil	resíduos PET e SCA (cinza de cana-de-açúcar)	Mecânica	Sem adição de calor

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Reduction of polycyclic compounds and biphenyls generated by pyrolysis of industrial plastic waste by using supported metal catalysts: A case study of polyethylene terephthalate treatment	2020	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Pirólise
Ultraviolet protection of recycled polyethylene terephthalate	2017	Estados Unidos	PET PÓS-CONSUMO (PC-PET)	Mecânica	Com adição de calor
Improved asphalt binder using recycle polyethylene terephthalate polymer	2019	Iraque	reciclar polietileno tereftalato de garrafas de água potável	Mecânica	Com adição de calor
Compound modification of asphalt with styrene-butadiene-styrene and waste polyethylene terephthalate functionalized additives	2020	Índia	Garrafas PET	Química	Aminólise
Reinforcement of Asphalt Concrete Mixture using Recycle Polyethylene Terephthalate Fibre	2016	Malásia	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Preparation and characterization of waterborne alkyd-amino baking coatings based on waste polyethylene terephthalate	2020	China	Garrafas PET	Química	Glicólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Utilization of waste polyethylene terephthalate bottles to develop metal-organic frameworks for energy applications: A clean and feasible approach	2020	Arábia Saudita	Garrafas PET	Química	Carbonização
Investigating the mechanical properties of asphalt concrete containing waste polyethylene terephthalate	2019	Iran	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Rapid Upcycling of Waste Polyethylene Terephthalate to Energy Storing Disodium Terephthalate Flowers with DFT Calculations	2020	Índia	Flocos de PET	Química	Saponificação
Synthesis of mixed ligand and pillared paddlewheel MOFs using waste polyethylene terephthalate material as sustainable ligand source	2016	Taiwan	Garrafas PET	Química	Carbonização
Recycling and depolymerization of waste polyethylene terephthalate bottles by alcohol alkali hydrolysis	2018	China	Garrafas PET	Química	Hidrólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Properties of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt Mixes: Dependence on PET Size, PET Content, and Mixing Process	2018	Índia	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Effect of waste polyethylene terephthalate (PET) on properties of road aggregate	2019	Malásia	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Exploration of reaction mechanisms on the plastic waste polyethylene terephthalate (PET) dissolved in phenol steam reforming reaction to produce hydrogen and valuable liquid fuels	2020	Malásia	Garrafas PET	Química	Pirólise
Synthesis and characterization of waterborne polyurethane dispersion from glycolyzed products of waste polyethylene terephthalate used as soft and hard segment	2017	China	Garrafas PET	Química	Glicólise
Data of characterization of electrospun waste polyethylene terephthalate (PET) nanofibers	2020	Iraque	Flocos de PET	Química	Electrospinning

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Utilization of air-plasma treated waste polyethylene terephthalate particles as a raw material for particleboard production	2016	República Tcheca	Flocos PET	Mecânica	Sem adição de calor
Fracture parameters assessment of lightweight concrete containing waste polyethylene terephthalate by means of SEM and BEM methods	2020	Iran	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
Experimental Study on the Use of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) and River Sand in Roof Tile Production	2019	Nigéria	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Using ionic liquid catalyst for conversion of waste polyethylene terephthalate and soybean oil to polyester polyol	2016	Vietnã	Garrafas PET	Química	Despolimerização
Effect of Sodium Boron Hydride (NaBH ₄) on Waste Polyethylene Terephthalate Pyrolysis	2019	Turquia	Flocos de PET	Química	Pirólise
Utilization of Plastic Waste Polyethylene Terephthalate (Pet) as a Coarse Aggregate Alternative in Paving Block	2019	Indonésia	Resíduos PET	Mecânica	Sem adição de calor

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Sodium Methoxide Catalyzed Depolymerization of Waste Polyethylene Terephthalate Under Microwave Irradiation	2018	Emirados Árabes Unidos	Garrafas PET	Química	Hidrólise
New methods for utilization of waste polyethylene terephthalate	2015	Rússia	PET	Química	Despolimerização
A novel and inexpensive method for producing activated carbon from waste polyethylene terephthalate bottles and using it to remove methylene blue dye from aqueous solution	2016	Iran	Garrafas PET	Química	Carbonização
Mechanical and thermal properties of eco-friendly coating obtained from products of waste polyethylene terephthalate	2018	Sérvia	Garrafas PET	Química	Glicólise
Extrusion and Evaluation of Chitosan Assisted AgNPs Immobilized Film Derived from Waste Polyethylene Terephthalate for Food Packaging Applications	2017	Índia	PET	Mecânica	Com adição de calor
Stiffness modulus of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixture: A statistical analysis of the laboratory testing results	2015	Malásia	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Optimization of asphalt and modifier contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology	2015	Malásia	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Degradation Process of Postconsumer Waste Bottle Fibers Used in Portland Cement–Based Composites	2017	Uruguai	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
Preparation of synthetic graphite from waste PET plastic	2019	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Pirólise
Cost-effective synthesis of NiCo ₂ O ₄ @nitrogen-doped carbon nanocomposite using waste PET plastics for high-performance supercapacitor	2020	Arábia Saudita	Resíduos PET	Química	Despolimerização
Waste PET as a Reactant for Lanthanide MOF Synthesis and Application in Sensing of Picric Acid	2015	China	Garrafas PET	Química	Hidrólise
Optimization of Microwave-Assisted Preparation of TPA from Waste PET Using Response Surface Methodology	2018	China	Garrafas PET	Química	Despolimerização

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Effect of Irradiated and Non-Irradiated Waste PET Based Cementitious Grouts on Flexural Strength of Semi-Flexible Pavement	2019	Malásia	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
Analysis of the effects of dioctyl terephthalate obtained from polyethylene terephthalate wastes on concrete mortar: A response surface methodology based desirability function approach application	2018	Turquia	Resíduos PET	Química	Alcoólise
Taguchi method for optimization of reaction conditions in microwave glycolysis of waste PET	2019	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Glicólise
The effect of waste PET addition on PFO-based anode materials for improving the electric capacity in lithium-ion battery	2020	Coreia do Sul	Resíduos PET	Química	Pirólise
Effect of PVP on the characteristic of modified membranes made from waste PET bottles for humic acid removal	2017	Indonésia	Garrafas PET	Química	Despolimerização

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
The performance of thermal property in concrete containing waste pet (polyethylene terephthalate) as an alternative sustainable building material	2020	Malásia	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
Producing of qualified oil and carbon black from waste tyres and pet bottles in a newly designed pyrolysis reactor	2019	Turquia	Resíduos de pneus e resíduos de PET	Química	Pirólise
The usage of novel acrylic-modified water-reducible alkyd resin obtained from post-consumer PET bottles in water-based paint formulation	2020	Egito	Garrafas PET	Química	Glicólise
Development of High-Performance Supercapacitor based on a Novel Controllable Green Synthesis for 3D Nitrogen Doped Graphene	2019	Egito	Garrafas PET	Química	Carbonização
Synthesis and film properties of epoxy esters modified with amino resins from glycolysis products of postconsumer PET bottles	2015	Turquia	Garrafas PET	Química	Glicólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Epoxy-based paints from glycolysis products of postconsumer PET bottles: synthesis, wet paint properties and film properties	2017	Turquia	Garrafas PET	Química	Glicólise
Preliminary Study on Compressive Strength of Porous Asphalt Containing Modified Buton Asphalt, Waste Plastic and Limestone Powder	2020	Indonésia	Resíduos PET	Mecânica	Sem adição de calor
Valorization of Poly (ethylene) terephthalate (PET) wastes into magnetic carbon for adsorption of antibiotic from water: Characterization and application	2018	Índia	Garrafas PET	Química	Pirólise
Preparation of polyurethane–alginate/chitosan core shell nanoparticles for the purpose of oral insulin delivery	2017	Índia	Garrafas PET	Química	Glicólise
Thermal degradation of waste plastics under non-sweeping atmosphere: Part 1: Effect of temperature, product optimization, and degradation mechanism	2019	Índia	Resíduos de plástico (excluindo resíduos de PVC)	Química	Pirólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Development of Prosopis juliflora carbon-reinforced PET bottle waste-based epoxy-blended bio-phenolic benzoxazine composites for advanced applications	2020	Índia	Garrafas PET	Química	Despolimerização
Prediction models of mechanical properties for pet-mortar composite in sodium sulphate aggressive mediums	2017	Argélia	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
Dual-step air-thermal treatment for facile conversion of PET into porous carbon particles with enhanced dye adsorption performance	2020	China	Garrafas PET	Química	Carbonização
Production and optimization of eco-efficient self compacting concrete SCC with limestone and PET	2018	Iraque	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building	2015	Itália	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor
Biodegradation of waste PET: A sustainable solution for dealing with plastic pollution	2019	Japão	Resíduo PET	Quaternária	Degradação Biológica

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Transforming Waste Poly(Ethylene Terephthalate) into Nitrogen Doped Carbon Nanotubes and Its Utility in Oxygen Reduction Reaction and Bisphenol-A Removal from Contaminated Water	2020	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Microwave
Mechanical Properties of Polyethylene Terephthalate Modified Pavement Mixture	2020	Iraque	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Plastic Fuel Conversion and Characterisation: A Waste Valorization Potential for Ghana	2020	Gana	Garrafas PET	Química	Pirólise
Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP)	2018	Hong Kong	Garrafas PET	Química	Aminólise
New Complex Epoxy Ester Resin-Based Binder: Synthesis and Influence on the Curing Process of Epoxyamine Compositions	2020	Rússia	Resíduos PET	Química	Despolimerização
Characterization of composite produced from waste PET and marble dust	2018	Turquia	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Effect of Compaction Temperatures on Marshall Properties on Hot Rolled Sheet-Base mixture with the addition of plastic waste	2020	Indonésia	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Synthesis of NiOx@NPC composite for high-performance supercapacitor via waste PET plastic-derived Ni-MOF	2019	Arábia Saudita	Garrafas PET	Química	Despolimerização
Investigation of tensile strength and elongation properties of chenille upholstery fabrics including recycling polyester yarns	2020	Turquia	Resíduos de garrafas PET e fios de poliéster	Mecânica	Sem adição de calor
Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete	2016	Bangladesh	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Biological Valorization of Poly(ethylene terephthalate) Monomers for Upcycling Waste PET	2019	Coreia do Sul	Garrafas PET	Química	Hidrólise
Effect of coconut-shell ash as filler and plastic bottle as substitution of porous asphalt mixture	2020	Indonésia	Garrafas PET	Mecânica	Sem adição de calor

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Waste PET plastic derived ZnO@NMC nanocomposite via MOF-5 construction for hydrogen and oxygen evolution reactions	2020	Arábia Saudita	Resíduos PET	Química	Despolimerização
Preparation and evaluation of waste PET derived polyurethane polymer modified bitumen through in situ polymerization reaction	2017	Índia	Garrafas PET	Química	Aminólise
Composite sulfur cathode for Li-S batteries comprising hierarchical carbon obtained from waste PET bottles	2020	Polônia	Garrafas PET	Química	Pirólise
Laboratory evaluation of the effect of waste plastic bottle (PET) on rutting performance of hot mix asphalt mixtures	2016	Iran	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Terephthalic acid from waste PET: An efficient and reusable catalyst for xylose conversion into furfural	2019	Eslováquia	Garrafas PET	Química	Despolimerização
Waste PET Chemical Processing to Terephthalic Amides and Their Effect on Asphalt Performance	2020	Estados Unidos	Garrafas PET	Química	Aminólise
Pyrolysis kinetic modelling of abundant plastic waste (PET) and in-situ emission monitoring	2020	Irlanda	Garrafas PET	Química	Pirólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Micropore-structured activated carbon prepared by waste PET/petroleum-based pitch	2019	Coreia do Sul	Resíduos PET	Química	Carbonização
Depolymerization of Waste PET with Phosphoric Acid–Modified Silica Gel Under Microwave Irradiation	2017	Japão	Garrafas PET	Química	Despolimerização
The mechanical properties of brick containing recycled concrete aggregate and polyethylene terephthalate waste as sand replacement	2018	Malásia	Resíduos PET	Mecânica	Sem adição de calor
Synthesis of poly(ethylene terephthalate) based on glycolysis of waste PET fiber	2020	China	Resíduos de fibra PET	Química	Glicólise
New Mortar Mixes with Chemically Depolymerized Waste PET Aggregates	2020	Itália	Garrafas PET	Química	Glicólise
Novel bifunctional dispersing agents from waste PET packaging materials and interaction with cement	2019	Egito	Garrafas PET	Química	Aminólise
Biodegradation of waste PET based copolyesters in thermophilic anaerobic sludge	2015	República Tcheca	Garrafas PET	Química	Glicólise

Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures	2017	Iran	Garrafas PET	Mecânica	Com adição de calor
Highly dispersed Pt catalyst supported on nanoporous carbon derived from waste PET bottles for reductive alkylation	2019	China	Garrafas PET	Química	Pirólise
Dispersion of multiwalled carbon nanotubes in waterborne polyurethane emulsions derived from alcoholysis products of waste PET and its effect on properties	2018	China	Garrafas PET	Química	Glicólise
Properties of eco-friendly pervious concrete containing polystyrene aggregates reinforced with waste PET fibers	2020	Iraque	Fibras PET recicladas	Mecânica	Sem adição de calor
Reaction kinetics and mechanism of catalyzed hydrolysis of waste PET using solid acid catalyst in supercritical CO ₂	2015	China	Resíduos de flocos PET	Química	Hidrólise

Fonte: A Autora, 2022

ANEXO B – Patentes usadas no trabalho como referência para prospecção tecnológica

 Tabela 4 - Lista das patentes considerada para elaboração do *technology roadmap* (continua)

Número	Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
RU2754972C1	Method for processing polyethylene terephthalate waste	2021	Rússia	PET	Química	Saponificação
RU2751941C1	Composite material based on secondary polyethylene terephthalate	2021	Rússia	PET	Mecânica	Com adição de calor
KR20210066354A	Recovery method for direct polyol from polyethylene terephthalate wastes	2021	República da Coreia	PET	Química	Despolimerização
ES2823925A1	PROCEDURE FOR OBTAINING A RECYCLED MATERIAL FROM MULTILAYER PET CONTAINERS AND RECYCLED MATERIAL OBTAINED WITH THE SAME	2021	Espanha	PET	Química	Despolimerização
RU2019129956A	Method of producing decomposition products of secondary polyethylene terephthalate for structural materials	2021	Rússia	PET	Química	Pirólise
CN112055741A	Method of obtaining carbon-containing material from recyclable tires and/or rubber products	2020	China	PET, PE, PP e OS	Química	Pirólise

Número	Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
CN111690559A	Stenotrophomonas maltophilia capable of degrading polyethylene glycol terephthalate	2020	China	PET	Química	Despolimerização
RU2724893C1	Method of producing terephthalic acid from polyethylene terephthalate wastes	2020	Rússia	PET	Química	Hidrólise
KR20200046198A	Method for producing dioctylterephthalate and antifreeze simultaneously by using polyethyleneterephthalate	2020	República da Coreia	PET	Química	Despolimerização
CN210450255U	PET plate recycling and reprocessing system	2020	China	PET	Mecânica	Com adição de calor
US2020056009A1	Chemical recycling of polyethylene terephthalate by microwave irradiation	2020	Estados Unidos	PET	Química	Despolimerização
PL3377569T3	Chemical recycling of polyethylene terephthalate by microwave irradiation	2020	Polônia	PET	Química	Despolimerização
RU2710907C1	Multilayer material based on foamed secondary polyethylene terephthalate and method of its production	2020	Rússia	PET	Química	Policondensação
RU2707260C1	Complex method of producing composite sleepers by processing wood and polymer wastes	2019	Rússia	PET, HDPE e LDPE	Mecânica	Com adição de calor
US2019315962A1	Recycled polyethylene terephthalate compositions, fibers and articles produced therefrom, and methods for producing same	2019	Estados Unidos	PET	Mecânica	Com adição de calor

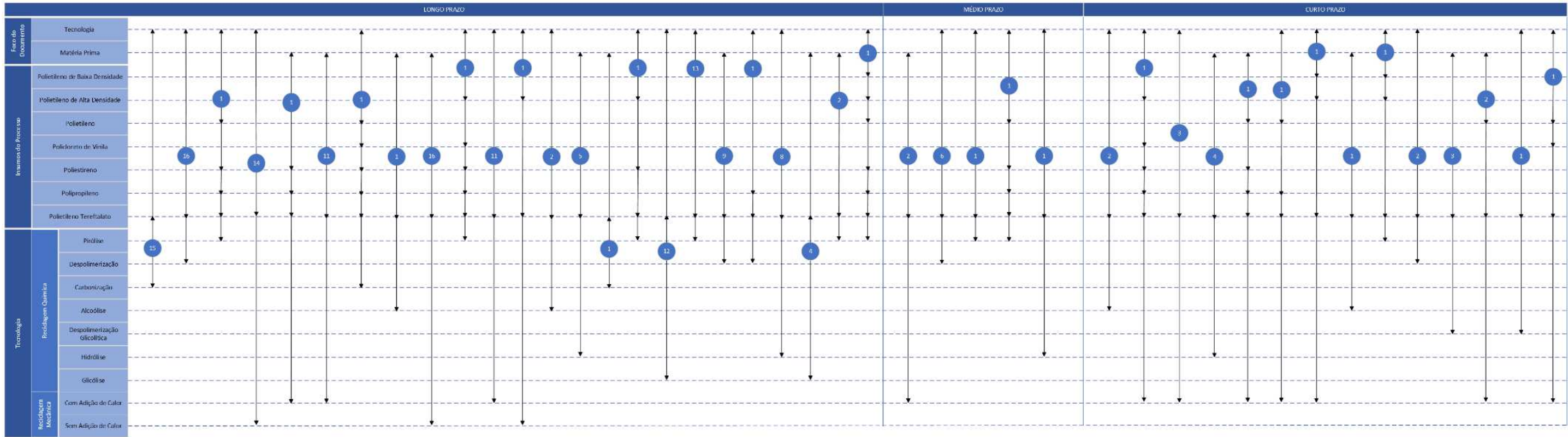
Número	Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
US2019256704A1	Recycled polyethylene terephthalate compositions, fibers and articles produced therefrom, and methods for producing same	2019	Estados Unidos	PET	Mecânica	Com adição de calor
US2019218362A1	Methods for recycling cotton and polyester fibers from waste textiles	2019	Estados Unidos	PET	Química	Reação subcrítica com água
RO133422A2	Hybrid polymer composite based on recycled polyethylene terephthalate reinforced with functionalized natural fibres	2019	Romênia	PET	Química	Tratamento com material orgânico
US2019127549A1	Liquid modified pet polyesters for lithographic inks	2019	Estados Unidos	PET	Química	Alcoólise
RO133259A0	Installation for recycling plastic waste	2019	Romênia	PET, HDPE e LDPE	Química	Pirólise
CZ307751B6	A method of producing terephthalic acid from waste polyethylene terephthalate	2019	República Tcheca	PET	Química	Despolimerização
KR101964361B1	Manufacturing method of oriented polymer paint composition using wasted polyethylene terephthalate and paint composition manufactured by the method	2019	República da Coreia	PET	Química	Tratamento de oxidação
US2018319950A1	Chemical recycling of polyethylene terephthalate by microwave irradiation	2018	Estados Unidos	PET	Química	Depolimerização glicolítica
CN108602974A	Chemical recycling of polyethylene terephthalate by microwave irradiation	2018	China	PET	Química	Depolimerização glicolítica

Número	Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
EP3377569A1	Chemical recycling of polyethylene terephthalate by microwave irradiation	2018	Organização Europeia de Patentes	PET	Química	Depolimerização glicolítica
KR101888612B1	Method for chemical recycling of glycol modified polyethylene terephthalate wastes	2018	República da Coreia	PET	Química	Despolimerização
KR20180090558A	Novel microorganism with plastic-degrading activity and use thereof	2018	República da Coreia	PET, PP, PS e PVC	Química	Decomposição por microorganismo
US2018201743A1	Use of recycled packaging in polymer composite products	2018	Estados Unidos	PET e PE	Mecânica	Com adição de calor
US2018201742A1	Use of recycled packaging in polymer composite products	2018	Estados Unidos	PET e PE	Mecânica	Com adição de calor
EP3320017A1	Process for the production of glycol-modified polyethylene terephthalate from recycled raw materials	2018	Organização Europeia de Patentes	PET	Química	Depolimerização glicolítica
RU2645994C2	Method for manufacturing heat and sound insulating construction material	2018	Rússia	PET, PE e PVC	Mecânica	Com adição de calor
PL418075A1	Production line for manufacturing the packing band from polyethylene terephthalate obtained from recycling and method for producing it	2018	Polônia	PET	Mecânica	Com adição de calor
CN107556468A	Method for preparing aromatic polyether ester polyol from waste PET (polyethylene terephthalate) as raw materials	2018	China	PET	Química	Alcoólise

Número	Título	Ano	País	Matéria-Prima	Reciclagem	Processo
CN107216250A	Method for preparing dioctyl terephthalate by using polyethylene terephthalate waste	2017	China	PET	Química	Alcoólise
AU2015350093A1	Systems and methods for manufacturing bulked continuous filament	2017	Austrália	PET, HDPE, PP, PS e PVC	Mecânica	Com adição de calor
EA201600222A1	Polymer-rubber composition and method of production thereof	2017	Organização de Patentes da Eurásia	PET	Mecânica	Com adição de calor
RU2616299C1	Method for waste pet alkaline hydrolysis with terephthalic acid production	2017	Rússia	PET	Química	Hidrólise
RU2015120917A	Method for processing wood and thermopolymer waste and manufacturing of railway sleepers	2016	Rússia	PET	Mecânica	Com adição de calor
US2016355663A1	Polymer composition from mixed plastic waste	2016	Estados Unidos	PET, PP, PE e PS	Mecânica	Com adição de calor
CN105367415A	Recycling system for chemical recycling method of waste PET materials	2016	China	PET	Química	Hidrólise
TW201607975A	Method of producing eco-friendly electronic boards using recycled plastic waste	2016	Taiwan	PET, PE e PP	Mecânica	Com adição de calor

Fonte: A Autora, 2022

ANEXO C – Technology *roadmap* finalizado



Fonte: A Autora