



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto de Química

Lívia Gomes Monteiro

Technology roadmap:

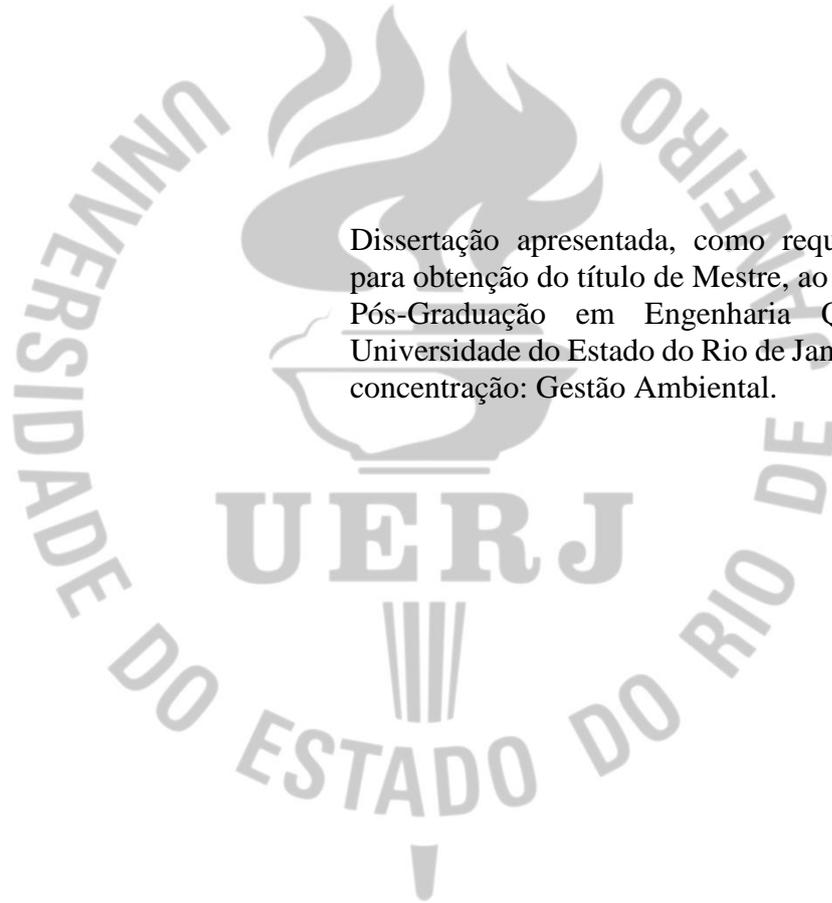
Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos.

Rio de Janeiro

2022

Lívia Gomes Monteiro

Technology roadmap: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos.



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: Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Gaya de Figueiredo

Rio de Janeiro

2022

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

P436 Monteiro, Livia Gomes.

Technology roadmap: nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos. – 2022.

254 f.

Orientador(a): Marco Antonio Gaya de Figueiredo

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

1. Água - Purificação – Teses. 2. Resíduos industriais – Teses. 3. Nanomateriais – Teses. I. Figueiredo, Marco Antonio Gaya de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Química. III. Título.

CDU 628.16

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



Assinatura

02/09/2022

Data

Lívia Gomes Monteiro

Technology roadmap: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos.

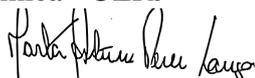
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Gestão Ambiental.

Aprovada em 18 de Julho de 2022.

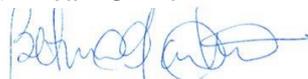
Banca Examinadora:



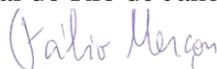
Prof. Dr. Marco Antonio Gaya de Figueiredo (Orientador)
Faculdade de Química - UERJ



Prof.^a Dra. Marta Antunes Pereira Langone
Faculdade de Química - UERJ



Dra. Betina Maciel Versiani
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Prof. Dr. Fabio Merçon
Faculdade de Química - UERJ

Rio de Janeiro
2022

AGRADECIMENTOS

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.

Ao professor Dr. Marco Antonio Gaya Figueiredo, orientador amigo, por toda a atenção e conselhos dados durante o desenrolar deste trabalho.

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

Aos meus pais, Vanildo Gomes Monteiro e Maria Inez Gomes Henrique Monteiro, por todo o caminho já traçado e todo suporte dado para que eu estivesse aqui hoje alcançando este novo patamar em minha vida.

Ao meu amigo, parceiro, cúmplice e namorado, Leonardo Esteves Ferreira Mendes, que deu seu apoio, compreensão nos momentos que precisei estar ausente, auxiliou-me nos momentos de dúvida e contribuiu para a conclusão deste trabalho.

Seu trabalho vai ocupar uma grande parte da sua vida, e a única maneira de estar verdadeiramente satisfeito é fazendo aquilo que você acredita ser um ótimo trabalho. E a única maneira de fazer um ótimo trabalho é fazendo o que você ama fazer. Se você ainda não encontrou, continue procurando!

Steve Jobs

RESUMO

MONTEIRO, L. G. *Technology roadmap: nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos*. 2022. 254 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A água residual industrial contaminada por corantes orgânicos sintéticos é uma grande ameaça ambiental que necessita de tratamento para sua adequação e, conseqüente, minimização da poluição dos recursos hídricos terrestres durante a sua reintrodução nos corpos de águas receptores. Nas últimas décadas, os avanços da nanotecnologia vêm trazendo sua contribuição nesse caminho, permitindo a aplicação dos nanomateriais (NMs) projetados em diferentes técnicas de tratamento. Por possuírem propriedades únicas, os NMs garantem a recuperação e eliminação eficiente dos contaminantes considerados, atingindo os padrões desejáveis de qualidade do efluente para descarte e contribuindo, inclusive, para o incentivo ao reuso da água no processo, o que representa uma economia de custos e uma menor dependência dos recursos hídricos. Dessa forma, o objetivo desse trabalho abrange a verificação das tendências relacionadas à aplicação dos NMs ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos. O trabalho foi realizado utilizando o método *Technology Roadmapping* (TRM), designado como uma abordagem estratégica para o gerenciamento e planejamento da inovação de curto, médio e longo prazo, que pretende compreender a evolução tecnológica de um produto ou processo. Uma estratégia de busca e análise específica para os NMs aplicados ao tratamento de águas contaminadas por corantes foi realizada entre setembro e outubro de 2021 em bases de dados relevantes, a saber: WIPO PatentScope, PatentInspiration, INPI e Scopus. Dentre o total de 1851 documentos levantados foram analisados somente os considerados relevantes para o estudo, sendo 215 artigos científicos, 27 patentes concedidas e 52 patentes solicitadas. As informações obtidas foram dispostas no formato de um mapa indicativo de tecnologia e organizações atuantes ao longo do tempo, chamado de *technology roadmap*. Por meio desse mapa foi possível identificar os principais atores que implementam tecnologia de produção de NMs catalíticos no momento atual, como sendo: KRONOS Worlwide, QuantumSphere, Hyperion Catalysis International, Mach I, TitanPE Technologies, DK Nano Technology, Ishihara Sangyo Kaisha, Sakai Chemical e CRISTAL. Já com relação à produção técnicocientífica, especialmente artigos e patentes, tem-se as universidades Chinese Academy of Sciences, Amity University e King Abdulaziz University. Observa-se no curto, médio e longo prazo uma tendência de busca pela diversificação da matéria-prima, com estudos voltados para o uso de insumos minerais, sintéticos, biológicos e residuais. Além disso, nota-se também uma propensão de busca por NMs híbridos e multifuncionais, para superar as dificuldades existentes nas suas formas independentes, atendendo impressionantemente às expectativas do mercado. O Brasil aparece no curto, médio e longo prazo do mapa, com duas patentes concedidas, nove solicitadas e cinco artigos científicos. Com o auxílio do TRM foi possível mapear o estado atual e prever as tendências na produção dos NMs aplicáveis ao tratamento de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos, de uma forma simples e visualmente conveniente, fornecendo dados importantes sobre as oportunidades e os desafios nesse setor.

Palavras-chave: Nanomateriais. Corante. Tratamento. Água residual industrial. *Technology roadmapping*. *Roadmap*.

ABSTRACT

MONTEIRO, L. G. *Technology roadmap: nanomaterials applied to the tertiary treatment of industrial wastewater contaminated by synthetic organic dyes*. 2022. 254 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Industrial wastewater contaminated by synthetic organic dyes is a major environmental threat that requires treatment for its adequacy and, consequently, minimization of pollution of terrestrial water resources during its reintroduction into receiving water bodies. In recent decades, advances in nanotechnology have contributed in this way, allowing the application of engineered nanomaterials (NMs) in different treatment techniques. Due to their unique properties, NMs guarantee the efficient recovery and elimination of the considered contaminants, reaching the desirable standards of effluent quality for disposal and also contributing to the incentive to reuse water in the process, which represents cost savings and less dependence on water resources. Thus, the objective of this work encompasses the verification of trends related to the application of NMs to the tertiary treatment of industrial wastewater contaminated by synthetic organic dyes. The work was carried out using the Technology Roadmapping (TRM) method, designated as a strategic approach to the management and planning of short, medium and long term innovation, which aims to understand the technological evolution of a product or process. A specific search and analysis strategy for NMs applied to the treatment of water contaminated by dyes was carried out between September and October 2021 in relevant databases, namely: WIPO PatentScope, PatentInspiration, INPI and Scopus. Among the total of 1851 documents surveyed, only those considered relevant to the study were analyzed, with 215 scientific articles, 27 granted patents and 52 requested patents. The information obtained was arranged in the format of an indicative map of technology and organizations operating over time, called a technology roadmap. Through this map, it was possible to identify the main actors that implement catalytic NM production technology at the present time, such as: KRONOS Worldwide, QuantumSphere, Hyperion Catalysis International, Mach I, TitanPE Technologies, DK Nano Technology, Ishihara Sangyo Kaisha, Sakai Chemical and CRYSTAL. Regarding technical-scientific production, especially articles and patents, there are the Chinese Academy of Sciences, Amity University and King Abdulaziz University. In the short, medium and long term, there is a tendency to search for the diversification of raw materials, with studies focused on the use of mineral, synthetic, biological and residual inputs. In addition, there is also a propensity to search for hybrid and multifunctional NMs, to overcome the difficulties existing in their independent forms, impressively meeting market expectations. Brazil appears in the short, medium and long term of the map, with two patents granted, nine requested and five scientific articles. With the help of TRM, it was possible to map the current state and predict trends in the production of NMs applicable to the treatment of industrial wastewater contaminated by synthetic organic dyes, in a simple and visually convenient way, providing important data on the opportunities and challenges in this area.

Keywords: Nanomaterials. Dye. Treatment. Industrial wastewater. Technology roadmapping. Roadmap.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da água no planeta terra.....	24
Figura 2 - Panorama do risco de escassez de água no mundo.....	26
Figura 3 – Distribuição do uso da água no mundo.....	27
Figura 4 – Percentual de águas residuais não tratadas em 2015 em países de diferentes níveis de renda e expectativas para 2030.....	28
Figura 5 – Aplicações industriais da nanotecnologia.....	41
Figura 6 - Fluxograma de classificação dos NMs baseada em dimensão e material.....	42
Figura 7 - Diagrama esquemático de NMs baseados em dimensão.....	43
Figura 8 - As abordagens <i>Top-down</i> e <i>Bottom-up</i> para obtenção dos NMs.....	45
Figura 9 - Técnicas de síntese <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i> para nanoestruturas.....	45
Figura 10 - Representação esquemática para a biossíntese de diferentes morfologias de NPs metálicas.....	47
Figura 11 - Exemplos de tipos de <i>technology roadmaps</i> , relativos a planejamento de: a) produto, b) serviço/capacidade, c) estratégia, d) longo prazo, e) ativos de conhecimento, f) programa, g) processo, h) integração.....	74
Figura 12 - Esquema genérico de um <i>technology roadmap</i> proposto pela EIRMA em 1997..	75
Figura 13 - Principais palavras-chave presentes na busca "TITLE-ABS-KEY(nanomaterial AND environment)".....	81
Figura 14 - Principais palavras-chave presentes na busca "TITLE-ABS-KEY(nanomaterial AND effluents AND treatment)".....	82
Figura 15 - Principais palavras-chave presentes na busca "TITLE-ABS-KEY(nanomaterial AND treatment AND aqueous AND effluents)".....	83
Figura 16 - Etapas de construção do <i>technology roadmap</i>	84
Figura 17 - Exemplo da disposição das informações no <i>technology roadmap</i> . (1) Título, (2) Divisão temporal, (3) Raias de alocação dos atores encontrados, (4) Separadores e (5) Taxonomias.....	88

Figura 18 - Exemplo da disposição dos atores encontrados no estudo e do uso das setas indicativas.....	89
Figura 19 - Principais classes de contaminantes removidos pelas técnicas de tratamento presentes nos artigos científicos.	97
Figura 20 - Principais compostos orgânicos presentes nos artigos científicos.....	98
Figura 21 - Porcentagem das técnicas de tratamento para os corantes orgânicos sintéticos presentes nos artigos científico.....	99
Figura 22 - Análise temporal das técnicas de tratamento de águas residuais destinadas a remoção de corantes orgânicos sintéticos como contaminante.	100
Figura 23 - Diagrama de fluxo da pesquisa e seleção dos artigos científicos da base Scopus.	101
Figura 24 - Diagrama de fluxo da pesquisa e seleção das patentes da base WIPO Patentscope.....	103
Figura 25 - Diagrama de fluxo da pesquisa e seleção das patentes da base PatentInspiration.....	104
Figura 26 - Diagrama de fluxo da pesquisa e seleção das patentes da base INPI.	105
Figura 27 - Evolução temporal do número de publicações de artigos científicos.....	109
Figura 28 - Artigos científicos separados pelos trita e seis países de origem que tiveram publicações.	110
Figura 29 - Seleção dos periódicos onde se publicaram pelo menos 3 artigos científicos.....	111
Figura 30 - Artigos científicos separados por tipo de instituição de origem.....	112
Figura 31 - Seleção das intituições de origem que publicaram pelo menos 2 artigos científicos.	113
Figura 32 - Artigos científicos separados pelas taxonomias adotadas.	114
Figura 33 - Porcentagem dos artigos científicos que abordaram cada uma das sete classes da “Característica do produto final”.....	115
Figura 34 - Porcentagem dos artigos científicos que abordaram cada um dos cinco tipos de funções do “Produto final”.	116
Figura 35 - Porcentagem dos artigos científicos que abordaram as diferentes combinações de funções no “Produto final”.	117

Figura 36 – Porcentagem dos artigos científicos que abrangem os dois tipos de classes de catalisadores.	118
Figura 37 - Porcentagem dos artigos científicos que empregam a associação de dispositivos e/ou aditivos ao tratamento.....	119
Figura 38 – Distribuição das diferentes formas de utilização dos dispositivos/aditivos nos processos de tratamento.....	120
Figura 39 – Porcentagem dos artigos científicos que abordam as diferentes classes da “Matéria-prima do NM”.	121
Figura 40 - Elementos químicos que compõem os NMs que aparecem em pelo menos 4 artigos científicos.	122
Figura 41 - Materiais sintéticos utilizados na obtenção dos NMs que aparecem em pelo menos 2 artigos científicos.	123
Figura 42 - Porcentagem dos artigos científicos que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Biológica.	124
Figura 43 - Porcentagem dos artigos científicos que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Resíduo.....	126
Figura 44 - Porcentagem dos artigos científicos que abordam a presença de suportes catalíticos.....	126
Figura 45 - Tipos mais comuns de materiais que desempenham a função de suporte catalítico nos artigos científicos.....	127
Figura 46 – Tipos de suportes catalíticos carbonáceos identificados nos artigos científicos.	129
Figura 47 - Série histórica das patentes concedidas.	130
Figura 48 - Patentes concedidas separadas por país de origem.....	131
Figura 49 - Patentes concedidas separadas por tipo de instituição de origem.....	132
Figura 50 - Patentes concedidas separadas por cessionários.....	133
Figura 51 - Patentes concedidas separadas pelas taxonomias.	134
Figura 52 - Porcentagem das patentes concedidas que abordaram cada uma das sete classes da “Característica do produto final”.	135
Figura 53 - Porcentagem das patentes concedidas que abordaram cada um dos cinco tipos de funções do “Produto final”.	136

Figura 54 - Porcentagem das patentes concedidas que abordaram as diferentes combinações de funções no “Produto final”	137
Figura 55 - Porcentagem das patentes concedidas que abrangem os dois tipos de classes de catalisadores.	138
Figura 56 - Porcentagem das patentes concedidas que empregam a associação de dispositivos e/ou aditivos ao tratamento.	138
Figura 57 – Porcentagem das patentes concedidas que abordam as diferentes classes da “Matéria-prima do NM”.	139
Figura 58 - Elementos químicos que compõem os NMs que aparecem em pelo menos 2 patentes concedidas.	141
Figura 59 - Materiais sintéticos utilizados na obtenção dos NMs que aparecem patentes concedidas.	142
Figura 60 - Porcentagem das patentes concedidas que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Biológica.	143
Figura 61 - Porcentagem das patentes concedidas que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Resíduo.	144
Figura 62 - Porcentagem das patentes concedidas que abordam a presença de suportes catalíticos.	145
Figura 63 - Tipos mais comuns de materiais que desempenham a função de suporte catalítico utilizados nas patentes concedidas.	145
Figura 64 – Tipos de suportes catalíticos carbonáceos utilizados nas patentes concedidas.	146
Figura 65 - Série histórica das patentes solicitadas.	148
Figura 66 – Patentes solicitadas separadas por país de origem.	149
Figura 67 - Patentes solicitadas separadas por tipo de instituição de origem.	149
Figura 68 - Patentes solicitadas separadas por cessionários que tiveram mais do que uma patente solicitada.	150
Figura 69 - Patentes solicitadas separadas pelas taxonomias.	151
Figura 70 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordaram cada uma das sete classes da “Característica do produto final”.	152

Figura 71 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordaram cada um dos cinco tipos de funções do “Produto final”.....	153
Figura 72 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordaram as diferentes combinações de funções no “Produto final”.....	154
Figura 73- Porcentagem das patentes solicitadas que abrangem os dois tipos de classes de catalisadores.....	155
Figura 74 - Porcentagem das patentes solicitadas que empregam a associação de dispositivos e/ou aditivos ao tratamento.....	156
Figura 75 - Distribuição das diferentes formas de utilização dos dispositivos/aditivos nos processos de tratamento.....	156
Figura 76 – Porcentagem das patentes solicitadas que abordam as diferentes classes da “Matéria-prima do NM”.....	157
Figura 77 - Elementos químicos que compõem os NMs que aparecem em pelo menos 2 patentes solicitadas.....	159
Figura 78 - Materiais sintéticos utilizados na obtenção dos NMs que aparecem em pelo menos 2 patentes solicitadas.....	160
Figura 79 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Biológica.....	161
Figura 80 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Resíduo.....	162
Figura 81 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordam a presença de suportes catalíticos.....	163
Figura 82 - Tipos mais comuns de materiais que desempenham a função de suporte catalítico utilizados nas patentes solicitadas.....	163
Figura 83 – Tipos de suportes catalíticos carbonáceos utilizados nas patentes solicitadas....	165
Figura 84 - Exemplo da colocação das linhas guias saindo das caixas de taxonomia e da interseção com as setas que saem dos atores (logomarcas).....	168
Figura 85 - Subdivisões da taxonomia final adotada no <i>raodmap</i> : Característica do Produto Final.....	168
Figura 86 - Subdivisões da taxonomia final adotada no <i>raodmap</i> : Produto Final.....	169

Figura 87 - Subdivisões da taxonomia final adotada no <i>raodmap</i> : Matéria-prima do NM....	170
Figura 88 - Exemplo de um <i>cluster</i> , onde a Deakin University, Central South University e Quaid-i-Azam University estão ligadas às mesmas taxonomias no <i>raodmap</i>	171
Figura 89 - Exemplo de uma parceria, onde a Djillali Liabes University Sidi Bel Abbas e Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) trabalharam juntas no desenvolvimento do trabalho.....	172
Figura 90 - <i>Technology roadmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Estágio Atual.	175
Figura 91 - <i>Technology roadmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Curto Prazo.	178
Figura 92 - <i>Technology roadmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Médio Prazo – Parte 1.....	182
Figura 93 - <i>Technology roadmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Médio Prazo – Parte 2.....	183
Figura 94 - <i>Technology roadmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 1.....	187
Figura 95 - <i>Technology roadmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 2.....	188
Figura 96 - <i>Technology roadmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 3.....	189
Figura 97 - <i>Technology roadmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 4.....	190

Figura 98 - <i>Technology raodmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 5.....	191
Figura 99 - <i>Technology raodmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 6.....	192
Figura 100 - <i>Technology raodmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 7.....	193
Figura 101 - <i>Technology raodmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 8.....	194
Figura 102 - <i>Technology raodmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 9.....	195
Figura 103 - <i>Technology raodmap</i> : Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 10.....	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maiores produtores mundiais de têxteis – 2018 (U\$\$ bilhões).	30
Tabela 2.1 – Classificação dos corantes baseada na estrutura molecular.....	56
Tabela 2.2 – Classificação dos corantes baseada na estrutura molecular.....	57
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens gerais dos métodos de remoção de corantes de águas residuais industriais atualmente em uso.	63
Tabela 4 – Principais <i>players</i> globais de nanocatalisadores para o setor de tratamento de águas.....	66
Tabela 5 - Fases do processo de aplicação do technology roadmapping segundo Garcia; Bray, 1997.....	76
Tabela 6 - Fases do processo de aplicação do technology roadmapping segundo Borschiver; Silva, 2016.....	77
Tabela 7 - Classificação da pesquisa realizada.....	78
Tabela 8 - Palavras-chave (em inglês) utilizadas para obter os artigos científicos na base de dados Scopus.	79
Tabela 9 - Palavras-chave (em inglês) utilizadas para levantamento dos artigos científicos na base de dados Scopus.	92
Tabela 10 - Estratégia de busca para refinamento dos artigos científicos na Scopus.	93
Tabela 11 - Lista das palavras-chave utilizadas na identificação das macro classes de contaminantes contidas nos artigos científicos.	95
Tabela 12 - Lista das palavras-chave utilizadas na identificação das técnicas de tratamento contidas nos artigos científicos.....	96
Tabela 13 - Lista das palavras-chave utilizadas nas categorias estabelecidas para análise dos compostos orgânicos contidos nos artigos científicos.....	98
Tabela 14 – Dados e palavras-chave utilizadas para levantamento das patentes concedidas e solicitadas.	102
Tabela 15 – Lista dos artigos científicos considerada para elaboração do <i>technology roadmap</i> (continua).....	218

Tabela 16 - Lista das patentes concedidas considerada para elaboração do <i>technology roadmap</i> (continua).....	238
Tabela 17 - Lista das patentes solicitadas considerada para elaboração do <i>technology roadmap</i> (continua).....	241
Tabela 18 - Lista das logomarcas das instituições considerada para elaboração do <i>technology roadmap</i> (continua).....	246

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDs	Pontos de carbono
CNTs	Nanotubos de carbono
CQDs	Pontos quânticos de carbono
CTAB	Brometo de cetiltrimetilamônio
EDTA	Ácido etilenodiaminotetracético
ETAD	The Ecological and Toxicological Association of Dyes and Organic Pigments Manufactures
ETARs	Estações de tratamento de águas residuais
GE	Grafite
GO	Óxido de grafeno
GR	Grafeno
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
ITP	Instituto de Tecnologia e Pesquisa
MCTI	Ministério da Ciência e Tecnologia
MNPs	Nanopartículas metálicas
NCs	Nanocompósitos
nm	Nanômetro
NM	Nanomaterial
NMs	Nanomateriais
NP	Nanopartícula
NPs	Nanopartículas
NTs	Nanotubos
ONU	Organização das Nações Unidas
PAA	Ácido poli(acrílico)
PAM	Poliacrilamida
PAN	Poliacrilonitrila
PANI	Polianilina
PEG	Poli(etilenoglicol)
PEO	Poli(óxido de etileno)

PET	Polietileno tereftalato
PMMA	Polimetilmetacrilato
POAs	Processos oxidativos avançados
PP	Polipropileno
PPO	Polioxifenileno
PVA	Poli(álcool vínlico)
PVDF	Poli(fluoreto de vinilideno)
PVP	Polivinilpirrolidona
QDs	Pontos quânticos
rGO	Óxido de grafeno reduzido
SDS	Dodecil sulfato de sódio ou lauril sulfato de sódio
TRM	<i>Technology roadmapping</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFScar	Universidade Federal de São Carlos
UFV	Universidade Federal de Viçosa
Unesco	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
Unipampa	Universidade Federal do Pampa
Unit	Universidade Tiradentes
UV	Ultravioleta
Vis	Visível

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	24
	OBJETIVOS	38
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
1.1	Nanomateriais	39
1.1.1	<u>Definições e características</u>	39
1.1.2	<u>Classificação dos nanomateriais</u>	41
1.1.3	<u>Síntese dos nanomateriais</u>	44
1.1.4	<u>Aplicação dos nanomateriais no tratamento de águas residuais</u>	47
1.2	Corantes orgânicos sintéticos como espécies contaminantes	53
1.2.1	<u>Técnicas de tratamento para águas residuais industriais contaminados por corantes orgânicos sintéticos</u>	61
1.3	Mercado global de nanomateriais catalíticos	65
2	PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA E <i>TECHNOLOGY ROADMAP</i>	67
2.1	Prospecção tecnológica	67
2.1.1	<u>Métodos de prospecção tecnológica</u>	69
2.2	<i>Technology roadmapping</i> (TRM)	70
2.2.1	<u>Histórico</u>	70
2.2.2	<u>Definições</u>	71
2.2.3	<u>Formas de apresentação</u>	72
2.2.4	<u>Os processos de aplicação do TRM</u>	75
3	METODOLOGIA	77
3.1	Metodologia do trabalho	78
3.1.1	<u>Etapas para a construção do trabalho de pesquisa</u>	79
3.1.2	<u>Metodologia de elaboração do <i>technology roadmap</i></u>	83
3.1.2.1	Fase pré-prospectiva.....	84

3.1.2.2	Fase de prospecção tecnológica	85
3.1.2.3	Fase pós-prospectiva	87
3.1.3	<u>Artigos científicos e documentos patentários como fonte de informação científica e tecnológica</u>	89
3.1.4	<u>Pesquisa bibliográfica</u>	91
3.1.4.1	Estratégias de busca, análise e seleção dos dados	91
3.1.5	<u>Definição das taxonomias</u>	105
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
4.1	Fase de prospecção tecnológica	108
4.1.1	<u>Prospecção tecnológica – artigos científicos</u>	108
4.1.1.1	Análise macro.....	108
4.1.1.2	Análise meso	113
4.1.1.3	Análise micro	114
4.1.2	<u>Prospecção tecnológica – patentes concedidas</u>	129
4.1.2.1	Análise macro.....	130
4.1.2.2	Análise meso	133
4.1.2.3	Análise micro	134
4.1.3	<u>Prospecção tecnológica – patentes solicitadas</u>	148
4.1.3.1	Análise macro.....	148
4.1.3.2	Análise meso	150
4.1.3.3	Análise micro	151
4.1.4	<u>Conclusões sobre a fase de prospecção tecnológica</u>	165
4.1.4.1	Situação do Brasil.....	166
4.2	Fase pós-prospectiva	167
4.2.1	<u>Estágio atual</u>	172
4.2.2	<u>Curto prazo</u>	176
4.2.3	<u>Médio prazo</u>	179

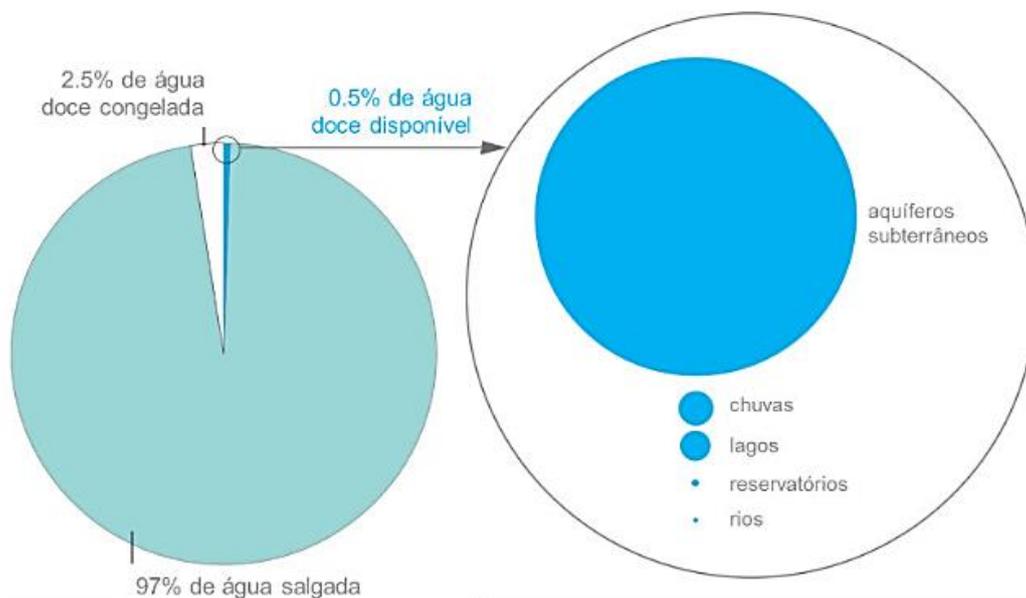
4.2.4	<u>Longo prazo</u>	184
	CONCLUSÃO	197
	REFERÊNCIAS	203
	APÊNDICE A – Artigos científicos utilizados como referência para a prospecção tecnológica.....	218
	APÊNDICE B – Patentes concedidas utilizadas como referência para a prospecção tecnológica.....	238
	APÊNDICE C – Patentes solicitadas utilizadas como referência para a prospecção tecnológica.....	241
	APÊNDICE D – Logomarcas das instituições citadas no <i>technology roadmap</i>	246

INTRODUÇÃO

A água, na sua forma ampla, é um recurso natural renovável que ocupa grande parte da superfície terrestre, aproximadamente 70%, mas a água doce, destinada as atividades humanas, é limitada em quantidade e qualidade (BRACK et al., 2017; KAMALI et al., 2019).

Aproximadamente 97% da água do planeta é salgada (mares e oceanos) e imprópria para o consumo humano, sendo apenas os 3% restantes o representativo da porção água doce, a qual é considerada potável. Desse quantitativo de água doce, 2,5% está presa em geleiras e 0,5% está realmente disponível, mas a maior parte está confinada em aquíferos subterrâneos, dificultando o acesso humano, e somente 0,04% está acessível na superfície, por meio de rios, lagos, mangues, entre outros, como mostra a Figura 1 a seguir (UN WWDR, 2006; RICHTER, 2015).

Figura 1 – Distribuição da água no planeta terra.



Fonte: UN WWDR, 2006.

Assim, é possível compreender que a água doce destinada ao consumo humano é de fato um recurso restrito e que necessita ser preservado e economizado para que a sua disponibilidade

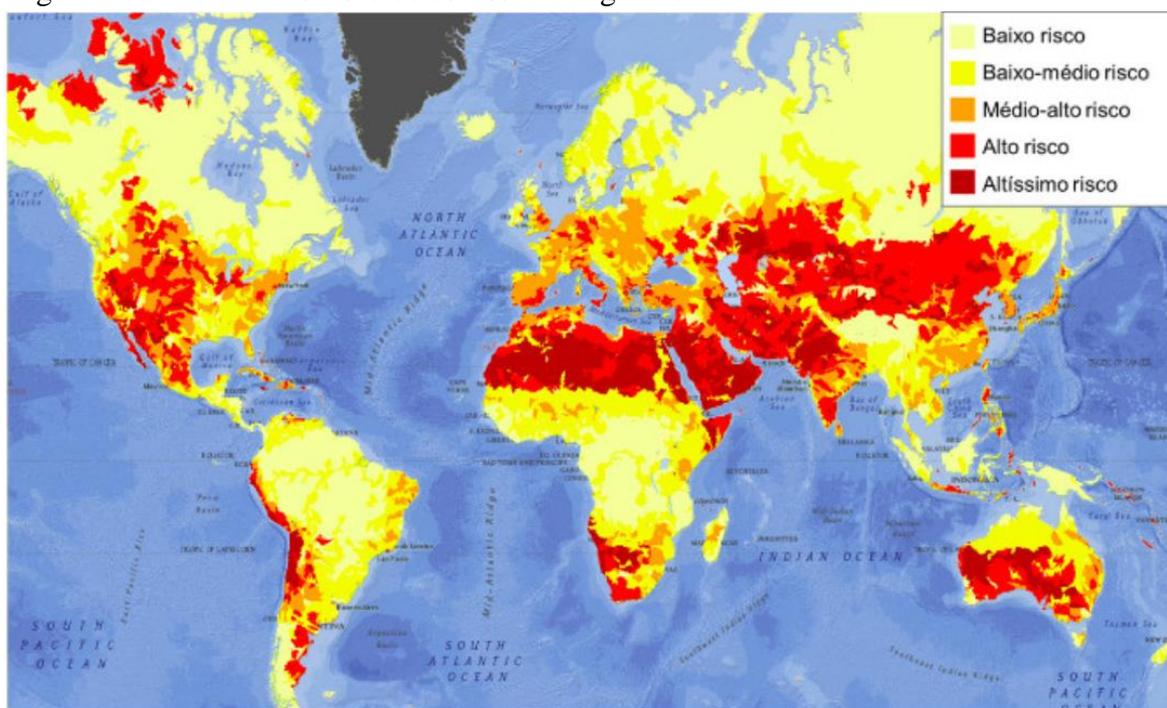
não seja comprometida, visto a sua imprescindibilidade para a existência humana, tornando-o um dos recursos naturais mais valiosos que planeta dispõe (RICHTER, 2015).

Com relação à distribuição dessa água doce pelo mundo, esta ocorre de forma desigual, com cerca de 60% do recurso disponível concentrado em apenas 10 países, sendo eles o Brasil, Rússia, Canadá, Indonésia, China, Colômbia, Estados Unidos, Peru, Índia e Zaire (República Democrática Congo) (RICHTER, 2015).

Dessa forma, o contexto que se evidencia é que o planeta tem água em abundância, porém grande parte não é apropriada para o consumo ou não está prontamente disponível, e diante das fontes mais facilmente acessíveis, estas estão distribuídas de forma desigual, de maneira que assegurar o acesso à água de qualidade para todos os fins humanos é uma dificuldade real e implica em custos relativamente elevados. Diante disso, estudos elaborados pela Organização das Nações Unidas (ONU) mostram que cerca de 10% das pessoas no mundo não têm acesso a uma quantidade mínima de água potável para consumo diário e grande parte do mundo já enfrenta problemas de escassez hídrica ou tem risco de enfrentar períodos de escassez (UN WWDR, 2006).

A Figura 2 a seguir mostra o panorama do risco de escassez de água no mundo, através de um índice que vai de baixo até altíssimo risco, sinalizando que mesmo em países com recursos hídricos abundantes existem riscos de escassez, seja por efeitos climáticos ou por dificuldades logísticas para o fornecimento de água (WRI, 2014).

Figura 2 - Panorama do risco de escassez de água no mundo.

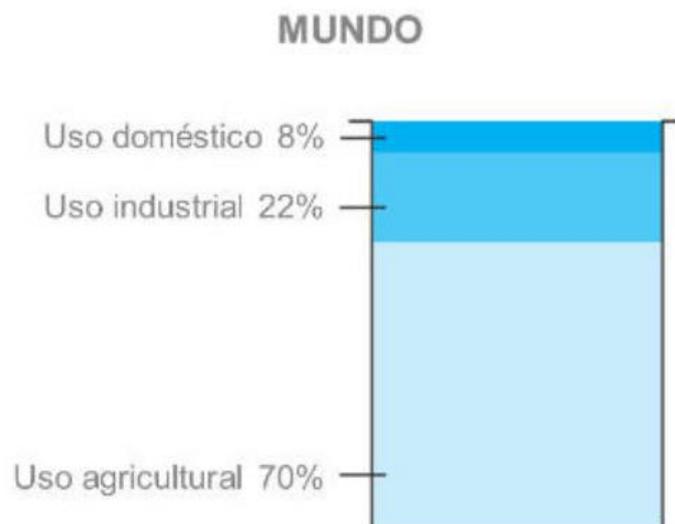


Fonte: WRI, 2014.

O Brasil nesse panorama é um país privilegiado, por dispor de mais água doce do que qualquer outro país no mundo, no entanto, já vivenciou o efeito da escassez - historicamente durante as secas que assolam o Nordeste e mais recentemente no episódio de racionamento na cidade de São Paulo em 2016, entre outros exemplos. Esse fato pode ser justificado pelo fato de que cerca de 75% da água do país está localizada nos rios da Bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população, de maneira que a disponibilidade do recurso é menor aonde a maior parte da população e das indústrias se encontram, nas cidades costeiras como Aracajú, Rio de Janeiro e São Paulo, criando regiões de médio e alto risco de escassez na costa brasileira (WRI, 2014; RICHTER, 2015).

Com relação ao uso da água doce no mundo, cerca de 70% é utilizada para irrigação e outros fins no setor de agricultura, 22% é relativo às utilizações industriais e 8% representam o uso doméstico (Figura 3).

Figura 3 – Distribuição do uso da água no mundo.



Fonte: UN WWDR, 2003.

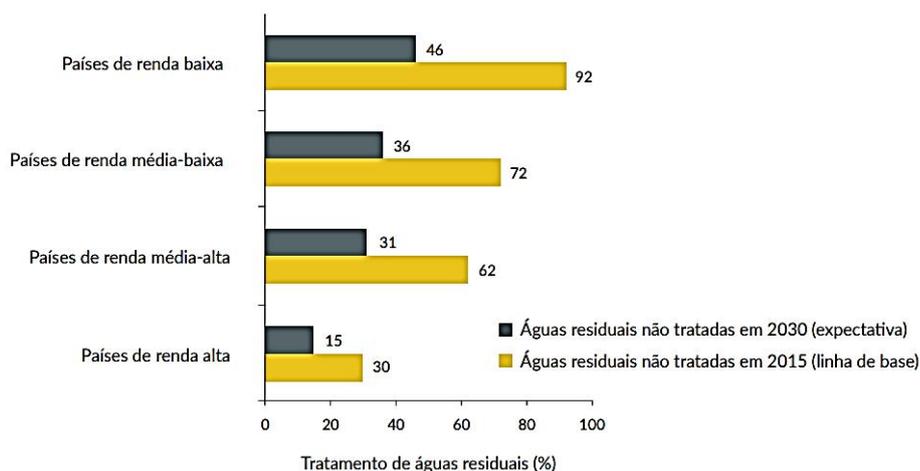
O uso do recurso hídrico por cada um desses setores também implica na produção de águas residuais contendo uma grande diversidade de compostos potencialmente nocivos ao meio ambiente e que devem ser olhadas com atenção. A medida que os países ao redor do mundo crescem e se desenvolvem, acarretam em um aumento geral da demanda por esse recurso, o que também leva a um aumento contínuo do volume de águas residuais produzidas e da poluição por elas geradas (ZANONI; YAMANAKA, 2016).

Segundo a World Business Council for Sustainable Development (2018), no decorrer das próximas três décadas, pressupõe-se um crescimento de 40% a 50% na demanda de água para o sistema alimentar global; de 50% a 70% para o setor municipal e industrial; e de 85% para o setor de energia. Como consequência, um aumento proporcional ocorrerá na geração das águas residuais, que representam uma ameaça de contaminação das fontes de água doce ainda disponíveis (BRACK et al., 2017). Assim, tem-se um comprometimento considerável da disponibilidade do recurso hídrico e uma crescente competição por ele, que exigem das empresas uma atuação imediata e uma mudança radical na maneira como gerenciam esse recurso (WBCSD, 2018).

Estimativas da Unesco revelam que, atualmente, cerca de 80% dos efluentes aquosos gerados ao redor do mundo são despejados no meio ambiente sem um tratamento adequado (WWDR, 2017). Praticamente em todos os países do mundo, excetuando aqueles mais

desenvolvidos, a maior parte das águas residuais é descartada diretamente no meio ambiente sem passar por tratamentos convenientes, como pode ser verificado na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Percentual de águas residuais não tratadas em 2015 em países de diferentes níveis de renda e expectativas para 2030.



Fonte: WWDR, 2017.

Observando a distribuição dos países com relação ao nível de rendimento, nota-se que os países de alta renda não garantem a tratabilidade de cerca de 30% das águas residuais urbanas e industriais que produzem e essa proporção cresce consideravelmente para as demais classes de países, aumentando para 62% nos países de média-alta renda, para 72% nos países de média-baixa renda e para, alarmantemente, 92% nos países de baixa renda. Com relação ao Brasil, avalia-se que entre 50% e 60% da água residual não receba nenhum tipo de tratamento (WWDR, 2017).

Assim, levando em consideração esse cenário preocupante, constata-se como consequência a geração de impactos nocivos seja na saúde humana, nos ecossistemas, na qualidade das águas doces e também na produtividade econômica dos países (CHEQUER et al., 2013). Porém, existe uma expectativa, segundo a Unesco, de que até 2030 ocorra uma redução significativa do quantitativo mundial de efluente não tratado, com um representativo ao redor de 50% em relação à base de 2015 (WWDR, 2017).

Os incentivos que conduzem as ações dos países desenvolvidos para garantir o tratamento avançado das águas residuais são a conservação da qualidade do meio ambiente e/ou a procura por uma fonte alternativa de água para enfrentar o cenário vivenciado de escassez

desse recurso. Apesar disso, a ausência tratamento das águas residuais para seu descarte permanece sendo uma prática comum, principalmente quando se fala dos países em desenvolvimento e subdesenvolvidos, em razão da insuficiência de infraestrutura, de capacidade técnica e institucional, e de financiamento (WWDR, 2017).

No contexto do crescente cenário de escassez de água mundial e a apreensão pela demanda por água potável limpa e segura, as águas residuais são um recurso valioso e de forte potencial para se tornarem importantes fontes para atender a progressiva demanda por água doce e outras diversas matérias-primas, desde que a elas sejam aplicados os tratamentos apropriados (OJHA et al., 2021).

Destacando o setor industrial, segundo as Nações Unidas, cerca de 400 milhões de toneladas de metais pesados, solventes, iodo tóxico e outros resíduos industriais chegam às águas do planeta anualmente (ECODEBATE, 2019). O contínuo crescimento das atividades industriais, principalmente nos países em desenvolvimento, avança a quantidade de resíduos aquosos gerados pelos processos produtivos e, conseqüentemente, o potencial de impacto ambiental que pode ser gerado se o lançamento ocorrer sem tratamento prévio.

Nesse contexto, a indústria têxtil é mundialmente conhecida como um dos maiores consumidores de água em seus processos produtivos e, conseqüentemente, uma das maiores geradoras de efluentes aquosos industriais contaminados por uma variedade de produtos químicos e corantes orgânicos sintéticos (ZANONI; YAMANAKA, 2016).

Devido a ampla aplicação de corantes orgânicos sintéticos nesse segmento e as volumosas perdas dessas substâncias durante as etapas do processo industrial, essas macromoléculas complexas e recalcitrantes tornam-se parte importante dos resíduos industriais gerados, com quantidades expressivas sendo lançadas diariamente no meio ambiente sem o tratamento apropriado, o que tem potencial de provocar severos impactos ambientais e o comprometimento de fontes hídricas ainda disponíveis (RAMAN et al., 2016; PAPADOULOU et al., 2013; SARAYU et al., 2012; RAUF et al., 2012).

A distribuição da produção mundial de têxteis por países pode ser verificada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Maiores produtores mundiais de têxteis – 2018 (US\$ bilhões).

Ranking	País	US\$ bilhões
1	China	421,150
2	Índia	67,244
3	E.U.A.	53,523
4	Japão	36,521
5	Turquia	32,271
6	Itália	24,822
7	Coreia do Sul	18,166
8	Alemanha	14,346
9	Vietnã	13,295
10	Brasil	12,946
11	Tailândia	9,128
12	Reino Unido	7,279
13	Espanha	6,559
14	França	6,239
15	África do Sul	4,617
16	México	4,549
17	Rússia	4,478
18	Portugal	4,402
19	Bélgica	4,279
20	Irã	4,136

Fonte: MENDES JUNIOR, 2021.

Nota-se que a posição de liderança na produção mundial de têxteis é ocupada pela China, com um quantitativo que representa aproximadamente 60% de toda produção global, seguido da Índia, que ocupa o segundo lugar com 9% de representatividade. O Brasil nesse ranking está posicionado na décima posição, representando cerca de 2% desse mercado.

Dessa forma, as exigências dos Órgãos e Legislações Ambientais, que estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes aquosos para sua adequação, é uma forma de atuar na causa raiz do problema, forçando as indústrias a aplicarem tecnologias de tratamento eficientes para atingir níveis satisfatórios de qualidade da água, o que permite alcançar a preservação do meio ambiente (minimização dos danos ponteciais) e obter fontes alternativas

de água, possibilitando a continuidade do desenvolvimento dos países e de suas atividades industriais de maneira sustentável (KAMALI et al., 2019).

Portanto, é imprescindível o comprometimento progressivo da alta liderança empresarial em trazer para o centro da tomada de decisões e estratégias de negócios questões sobre a utilização, disponibilidade, riscos e segurança dos recursos hídricos. Crescentemente, a existência de estratégias empresariais na gestão hídrica será um elemento de competitividade e atração de investimentos (WBCSD, 2018).

O potencial da nanotecnologia no tratamento de águas residuais industriais

No setor industrial, a água pode ser considerada não só um desafio operacional e um item de custo, mas também uma possibilidade de crescimento visto que os estímulos para a redução do uso da água – incluindo a utilização das águas residuais e a reciclagem – refletem em menores custos e em uma diminuição da dependência dos recursos hídricos. Diante disso, estima-se um crescimento considerável para o mercado de tecnologias para o tratamento da água residual proveniente das atividades industriais (WBCSD, 2018).

Com os avanços da nanociência e nanotecnologia nas últimas décadas, considerada constituinte da 4ª Revolução Industrial (LAZZARETTI et al., 2019), a introdução de novos materiais no mercado, os nanomateriais (NMs), revolucionou não somente os produtos, mas também os bens de capital, como as máquinas e equipamentos utilizados nos mais diversos setores da economia, sendo considerado um mercado altamente promissor que cresce exponencialmente. Embora recentes, as pesquisas apontam NMs constituídos de diferentes formas, nomeadamente nanopartículas (NPs), nanotubos (NTs), nanoestruturados, nanocompósitos (NCs), nanofibras, por exemplo, possuem excelentes capacidades adsorptivas e catalíticas, além de uma ampla gama de características físico-químicas que os consideram altamente atraentes e promissores para a remoção de diferentes contaminantes presentes em águas (AHMED et al., 2021). Aliás, as técnicas baseadas em escala nano podem se tornar extremamente importantes para atender aos padrões de qualidade da água, especialmente para a remoção de poluentes emergentes e baixos níveis de contaminantes (ADELEYE et al., 2016). Nesse sentido, fica claro o potencial promissor da nanotecnologia, possibilitando a evolução e melhoria das técnicas de tratamento para o controle da poluição e redução dos danos ambientais gerados pelas atividades industriais, atuando diretamente na solução da problemática de contaminação e escassez do recurso hídrico.

Embora recentes, as pesquisas envolvendo as tecnologias, por exemplo, adsorção, filtração, sedimentação, fotocatalise, e o uso de NMs, como por exemplo, nanotubos de carbono, NPs de óxidos metálicos, nanocelulose, NPs magnéticas fitogênicas, mostram-se capazes de remover diferentes contaminantes das águas residuais (AHMED et al., 2021), conseguindo atingir os objetivos de garantir os elevados padrões de qualidade da água. Dessa forma, a utilização dos NMs possibilita superar possíveis limitações e dificuldades existentes nas técnicas convencionais. Mas apesar disso, a avaliação de parâmetros, como a disponibilidade real desses NMs para o uso em escala industrial, viabilidade técnica e econômica para implantação da tecnologia, além das vantagens e desvantagens, é decisivo para que a inovação nanotecnológica seja uma realidade possível, permitindo alcançar uma remoção eficaz dos contaminantes por estações de tratamento de águas residuais (ETARs).

Tendo em vista a relevância da nanotecnologia no contexto mundial, considera-se extremamente útil a realização de diagnósticos e estudos referentes a essas questões em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, inferindo o estado da arte e identificando os materiais, processos, tecnologia e setores industriais promissores ao uso da tecnologia, que podem servir como base para tomadas de decisões, investimentos, implantação e direcionamento de novos estudos na área. Nesse sentido, ter uma estratégia para estudo e entendimento do que está acontecendo e do que vai ser o futuro sobre nanotecnologia e sua perspectiva de aplicação no tratamento de águas residuais contaminadas por corantes orgânicos é, não só interessante, mas extremamente relevante, tendo em vista que um dos recursos naturais mais importantes para a humanidade está correndo sérios riscos de escassez e essa nanociência tem um potencial promissor na solução.

Nanotecnologia e os nanomaterias

A nanotecnologia é o entendimento, manipulação e controle da matéria em nanoescala, escala atômica e molecular, quando as propriedades diferem significativamente daquelas observadas na escala macro. Essa ciência atua no desenvolvimento de materiais e componentes que podem ser usados em quase todos os produtos manufaturados, nas mais diversas áreas de pesquisa e em praticamente todos os setores industriais (BUSSINGER; TOSE, 2017). Visto as inovações proporcionadas pelo avanço dessa tecnologia em nanoescala, uma revolução tecnológica e industrial significativa foi gerada.

Os NMs são definidos como materiais que possuem dimensões em nanoescala, ou seja, na faixa de comprimento de 1 nm a 100 nm aproximadamente. Apesar desta ser uma definição

mais genérica, existem enormes diferenças quanto a definição exata do que são os NMs entre diferentes organizações, como a International Organization for Standardization (ISO) e a Comissão Europeia. Na ISO, NMs são definidos como materiais com qualquer dimensão externa ou com estrutura interna ou estrutura de superfície em nanoescala e a nanoescala tem por definição o tamanho médio entre 1 nm e 100 nm (ISO/TS 80004-1:2015). Já a Comissão Europeia (2011) adotou a seguinte definição de NM: "Um material natural, incidental ou fabricado que contém partículas, no estado não ligado ou como um agregado ou como um aglomerado e para 50% ou mais das partículas na distribuição de tamanho numérico, uma ou mais dimensões externas está na faixa de tamanho de 1 nm a 100 nm. Em casos específicos e quando justificado por preocupações com o meio ambiente, a saúde, a segurança ou a competitividade, o limite de distribuição de tamanho numérico de 50% pode ser substituído por um limiar entre 1% e 50%."

Em virtude de sua escala, os NMs apresentam características especiais e únicas, além de tenderem a possuir propriedades físico-químicas diferentes das propriedades do mesmo material em maior escala, devido ao surgimento de efeitos quânticos de tamanho e fenômeno de superfície. Essa alteração nas propriedades fundamentais com a modificação do tamanho das partículas é designada de efeito do tamanho ou tamanho crítico (LOOS, 2014; SHARMA et al., 2015; ZARBIN, 2007).

Com relação a composição, os NMs podem ser elaborados com apenas um componente ou pela união de dois ou mais deles, os denominados nanocompósitos, que objetiva melhorar de forma significativa algumas propriedades quando comparadas aos componentes puros (BANIN et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2006).

A síntese desses materiais envolve basicamente dois processos: descendente (*top-down*) e ascendente (*bottom-up*). No *top-down*, os mecanismos e as estruturas são miniaturizados em escala nanométrica a partir de outras estruturas em escala maior, sendo o mais frequente até hoje, especialmente no campo da eletrônica. Já o *bottom-up*, começa com uma estrutura em nanoescala, um átomo ou molécula por exemplo, e através de um processo de montagem ou automontagem se cria um mecanismo maior do que o inicial (MARCONE, 2015).

Por fim, a realidade proporcionada pela nanotecnologia permite a elaboração de NMs, as chamadas NPs, nano-objetos, nanoestruturados, NCs com excelentes propriedades físicas e químicas, como óticas, elétricas, magnéticas, de transporte, catalíticas. Essas características garantem uma extensa aplicabilidade desses NMs em diversas áreas, como eletrônica; energia; biomedicina; meio ambiente; catálise; alimentação; têxtil; armazenamento de informações; dentre outras, e em variados produtos de consumo, como nos protetores solares; em calçados

esportivos; dispositivos eletrônicos; sensores; tecidos; cosméticos; automóveis; medicamentos; entre outros (HABA, 2013; YANG et al., 2017; STARK et al., 2015; SOENEN et al., 2015). Destacando as utilizações positivas para o setor ambiental/tratamento de efluente, verifica-se a existência de sistemas de purificação do ar com íons, purificação de águas residuais com nanobolhas ou sistemas de nanofiltração para remoção metais pesados, além de nanofotocatalisadores (como NPs de titânio), que conseguem mineralizar algumas espécies de poluentes através da utilização de energia solar, tornando o processo mais eficiente e limpo (SHAH; POWERS, 2015; TALEBZADEH et al., 2019).

Problema

Considerando as informações obtidas pelos estudos já realizados e o potencial competitivo do nanomaterial como um material de excelentes características e performance melhorada quando comparado aos materiais de maior escala, são colocadas as seguintes questões como o problema a ser desenvolvido neste estudo:

- 1) Existe algum movimento tecnológico no mundo para a produção de nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de efluentes aquosos industriais contaminados por corantes orgânicos sintéticos? Quem está se movimentando?
- 2) Quais seriam as tendências tecnológicas para esse nanomaterial no momento atual e no curto, médio e longo prazo?
- 3) Quais as expertises tecnológicas de cada organização que já atua no setor?
- 4) Quais universidades e institutos de pesquisa, no Brasil e no mundo envolvidos no assunto e quais são as suas respectivas expertises?

Delimitação do tema

Para obter respostas acerca das questões levantadas no item anterior, esse trabalho propõe uma análise mais detalhada das tecnologias que envolvem a produção e/ou aplicação dos nanomateriais ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos. Também serão levantadas as principais organizações atuantes no setor, delimitando quais as fontes de matéria-prima utilizadas, quais produtos são obtidos, quais características do nanomaterial/sistema de tratamento são garantidas e quais as tendências que estão surgindo nessa área.

Prospecção tecnológica e *technology roadmap*

Uma vez que o foco principal do estudo é a análise temporal, com uma visão de futuro, das tecnologias e mercados envolvidos com a aplicação de nanomateriais ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos, o uso da metodologia de prospecção tecnológica adapta-se bem com esse propósito. A prospecção tecnológica, designada como uma forma sistemática de mapeamento de desenvolvimentos tecnológicos e científicos futuros, possui a capacidade de influenciar substancialmente não só o setor industrial e a economia, mas também a sociedade como um todo (KUPFER et al., 2004).

A compreensão do ambiente tecnológico auxilia a criação de estratégias e posicionamentos perante a competitividade (entre empresas ou nações), e os desafios científicos e tecnológicos (ZACKIEWICZ et al., 2005). A utilização da prospecção pode ajudar, inclusive o governo de um país, a tornar suas políticas públicas mais apropriadas e flexíveis de acordo com as condições do ambiente tecnológico.

Existem variados métodos de prospecção tecnológica já desenvolvidos, identificados em qualitativos, quantitativos e semi-quantitativos (POPPER, 2008). Podem ser utilizados desde questionários e reuniões entre especialistas até métodos computacionais de busca e análise de palavras-chave em documentos científicos. Essas ferramentas são de grande relevância não só para as tomadas de decisão e direção, mas também para a definição de prioridades e antecipação de cenários (MCDOWALL, 2012).

O método chamado de *technology roadmapping* (TRM), ou mapeamento tecnológico, é definido como sendo um método semi-quantitativo, ou seja, em que são aplicados princípios matemáticos para quantificar ou mensurar a subjetividade, juízos racionais, valores e pontos de vista de especialistas (POPPER, 2008). O objetivo principal da ferramenta é a construção do *roadmap* tecnológico que procura mostrar, de forma simples e clara, as possibilidades de movimentação de um indivíduo (ou organização) em um espaço de tempo estabelecido (KAPPEL, 2001).

Visto como uma estratégia muito recorrida nos ambientes empresariais que desejam uma visão mais ampla sobre o mercado, produtos e tecnologias em relação ao tempo, o TRM é aplicado, fundamentalmente, para apoiar as tomadas de decisão e o planejamento estratégico de curto, médio e/ou longo prazo (PHAAL et al., 2001).

Justificativa

A contaminação dos recursos hídricos, um efeito colateral da industrialização, está se tornando um problema global cada vez maior com diversos contaminantes orgânicos e inorgânicos que se encontram nos corpos de águas. No contexto da crescente escassez de água mundial e a apreensão pela a demanda por água potável limpa e segura, as águas residuais são um recurso valioso e de forte potencial para se tornarem importantes fontes para atender a progressiva demanda por água doce e outras diversas matérias-primas, desde que a elas sejam aplicados os tratamentos apropriados (OJHA et al., 2021).

Com a evolução da nanotecnologia, a realização de estudos de prospecção tecnológica vem a ser importante para acompanhar o desenvolvimento tecnológico e auxiliar a tomada de decisão e o planejamento na área de nanotecnologia e produção dos nanomateriais (NMs) (MARTINO, 1993; PORTER et al., 1995). Dentre as técnicas prospectivas para o monitoramento tecnológico, evidencia-se a aplicação do *technology roadmapping* (TRM), que está baseado na análise de publicações técnicocientíficas, especialmente os artigos científicos e os documentos patentários (DANG et al., 2010; PORTER et al., 1995). A patente é uma fonte de informação relevante, por conter dados públicos de forma padronizada e de natureza técnica, legal e de negócio, que dificilmente é encontrada em outra fonte.

Assim, o mapeamento estratégico, ou seja, a investigação do estágio atual da tecnologia e sua projeção futura são elementos imprescindíveis para as tomadas de decisão de qualquer organização. As empresas de grande porte, atuantes do setor de tratamento de efluentes e meio ambiente, utilizam de modo frequente várias formas de avaliação e prospecção de tecnologias e de mercado.

Muitos estudos já foram realizados sobre os NMs, a sua aplicabilidade, os seus aspectos econômicos e toxicológicos. Porém, o aspecto tecnológico detalhado, envolvendo uma tendência e especificando quais os tipos de produtos mais fabricados e as características garantidas, bem como os tipos de matéria-prima e quais os mais utilizados para a fabricação comercial dos NMs destinados ao tratamento de águas residuais industriais contaminados por compostos orgânicos, ainda não foram abordados por nenhum estudo até o presente momento.

Com tudo isso, pode-se concluir que o TRM é um método que se adapta muito bem no objetivo de criar uma base de informações sobre mercado e tecnologia a respeito do tema escolhido: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos. A promoção de uma síntese de pontos chave

para o acompanhamento da nanotecnologia de uma maneira simples e visualmente oportuna poderá influenciar tomadas de decisões para a adoção desses novos materiais (NMs) no tratamento de águas residuais industriais contaminados por corantes orgânicos sintéticos ao redor do mundo.

Estrutura do estudo

Para alcançar os objetivos propostos nesse trabalho, esse estudo foi organizado em quatro capítulos: 1) Revisão Bibliográfica, 2) Prospecção Tecnológica e *Technology roadmapping* (TRM), 3) Metodologia e 4) Resultados e Discussão. Por fim, é apresentada a conclusão.

No primeiro capítulo é apresentada a revisão bibliográfica do tema de estudo. São apresentados os conceitos e conhecimentos sobre os nanomateriais, a problemática dos efluentes aquosos industriais contaminados por corantes orgânicos sintéticos e o potencial de aplicação dos NMs nas técnicas de tratamento terciário de águas residuais.

No segundo capítulo, são relatados os conceitos sobre a prospecção tecnológica e o *technology roadmapping*. É mostrado um pequeno histórico, definições, formas de apresentação e os processos de aplicação.

No terceiro capítulo é contemplado a metodologia geral do estudo seguida para atingir os objetivos propostos. São delimitadas as linhas gerais características da pesquisa, a metodologia detalhada de busca e análise utilizada para obtenção dos dados e documentos, e todas as fases de elaboração do *roadmap*.

No quarto capítulo, os resultados e discussões são abordados. Primeiramente é apresentada a fase de prospecção tecnológica, exposta individualmente de acordo com cada tipo de documento analisado (artigo, patente concedida, patente solicitada), além de uma breve conclusão sobre os dados obtidos nesta etapa e a situação do Brasil. Num segundo momento é apresentado o *roadmap* finalizado (fase pós-prospectiva) segmentado em cortes temporais de estágio atual, curto prazo, médio prazo e longo prazo, assim como é mostrado uma análise do resultado em sua totalidade obtido pelo *roadmap*.

E para finalizar é apresentada uma conclusão que aborda e analisa estrategicamente os principais resultados obtidos durante o estudo e construção do *roadmap*, além de destacar o potencial brasileiro e os direcionamentos para trabalhos futuros.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Elaborar um *technology roadmap* dos nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos, especificamente processos que envolvam a degradação química, reações de oxidação ou redução, dos poluentes investigados, a fim de verificar as tendências tecnológicas e mercadológicas para o momento atual, curto, médio e longo prazo.

Objetivos específicos

Dessa forma, o estudo realizado neste trabalho tem como objetivos específicos:

- Realizar um levantamento bibliográfico em artigos e patentes sobre nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de efluentes aquosos industriais contaminados por corantes orgânicos sintéticos para criação de uma base sólida de conhecimento;
- Quantificar e analisar qualitativamente os documentos obtidos criando taxonomias que irão gerar os direcionadores (*drivers*) do estudo;
- Mapear as tendências tecnológicas utilizando o *technology roadmapping*;
- Revisar e analisar criticamente as informações obtidas a partir do mapa; e
- Identificar atores mundiais e brasileiros no segmento e oportunidades de produção dos nanomateriais.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são mostradas as definições e características, classificação e as principais rotas de síntese dos nanomateriais, além do potencial de aplicação dessa tecnologia no setor do meio ambiente. Serão ainda abordadas informações a respeito dos corantes orgânicos sintéticos, das técnicas de tratamento destinadas à sua remoção e/ou degradação e do mercado nanotecnológico que supre essa demanda.

1.1 Nanomateriais

1.1.1 Definições e características

Os nanomateriais (NMs) podem ser definidos, simplificada, como materiais que possuem em pelo menos uma de suas dimensões o tamanho na ordem de 1 a 100 nanômetros. Em geral, NMs existem naturalmente no ambiente, mas também podem ser produzidos intencionalmente ou não a partir de várias atividades humanas. Dessa forma, a expressão NMs é frequentemente usada para indicar NPs, nano-objetos, nanoestruturas, NCs e qualquer outro material que tenha pelo menos uma dimensão em nanoescala (SALEH et al., 2020).

Porém, segundo Zarbin (2007), há a necessidade de complementar essa definição, visto que só há um NM se existir ao menos uma propriedade que se manifesta exclusivamente devido ao tamanho reduzido e se essa propriedade é diferente do material em maior escala. Dessa forma, não basta um material ter apenas dimensões nanométricas para ser considerado um NM, mas também deve estar abaixo do tamanho específico capaz de alterar alguma de suas propriedades (SOUZA et al., 2013; ZARBIN, 2007; OLIVEIRA et al., 2005).

Nesse sentido, foi através do desenvolvimento da nanociência e nanotecnologia que a obtenção de forma intencional desses NMs com propriedades únicas e diferenciadas foi alcançada. Essa ciência e tecnologia estão alicerçadas no fato de que cada uma das propriedades dos materiais (ópticas, elétricas, magnéticas, de transporte, catalíticas etc), do modo como são

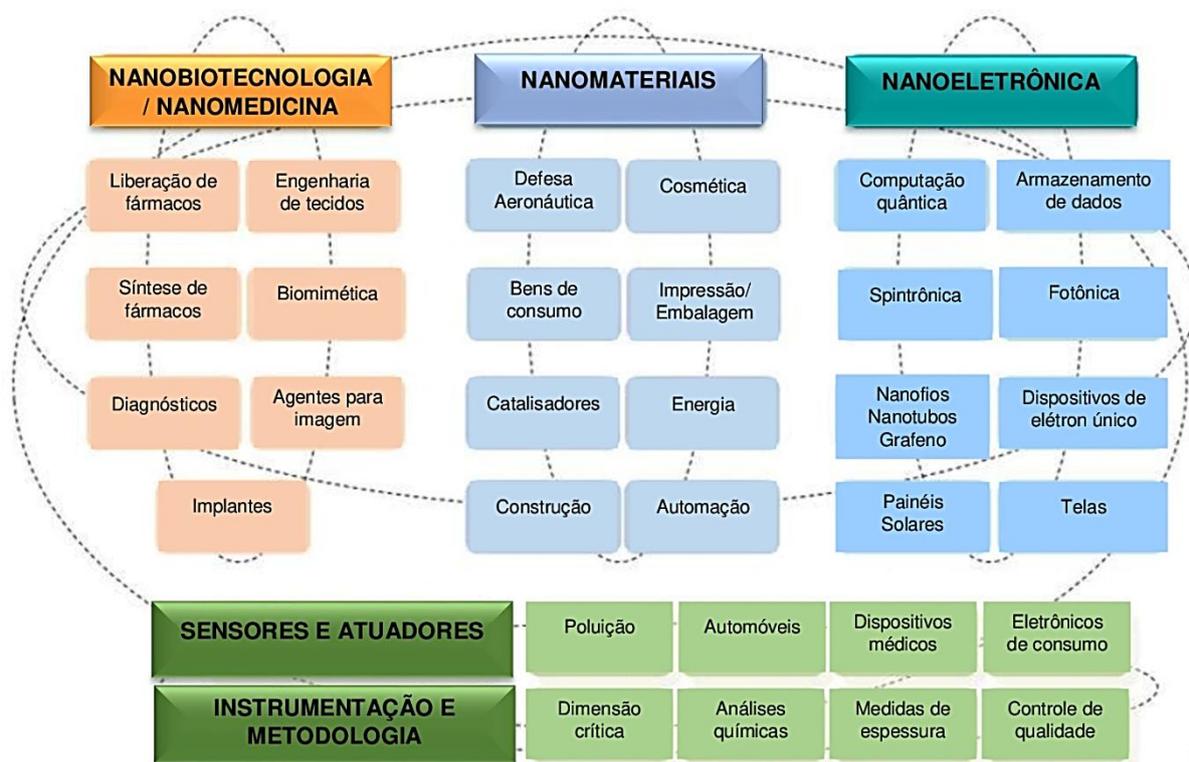
conhecidas, são fortemente dependentes de um determinado tamanho das partículas que o constituem, designado efeito de tamanho ou tamanho crítico (ZARBIN, 2007; LOOS, 2014).

Assim, se as partículas que compõem esse material estão abaixo desse tamanho crítico, a determinada propriedade se diferencia. Válido ressaltar que o tamanho crítico é diferente para cada uma das propriedades de um material específico e que para uma determinada propriedade, o tamanho crítico é diferente para materiais distintos. Adicionalmente, se as partículas do material estiverem abaixo do tamanho crítico, as suas propriedades também dependem e se diferenciam de acordo com o seu formato (como esférico, bastão, tubo, cristais) (OLIVEIRA et al., 2005; AL-JOHANI et al., 2017; BANACH et al., 2017).

Com relação aos produtos nanotecnológicos, estes são caracterizados por possuírem em sua composição NMs projetados que proporcionam desempenhos substancialmente aprimorados, incorporação de benefícios, efeitos potencializados, novas possibilidades de aplicação, entre outras coisas (BAIG et al., 2021). Os produtos sintetizados através dessa tecnologia emergente já estão amplamente difundidos no mercado nos mais diversos setores industriais desde antes do ano 2000 (ROCO et al., 2011).

Dessa forma, o campo da nanotecnologia segue em evolução com a disponibilização de ferramentas poderosas de caracterização e síntese para a produção de NMs com dimensões mais bem controladas e qualidades aprimoradas, aumentando as possibilidades de aplicação em uma grande variedade de bens de capital e de produtos de consumo nos diferentes setores industriais, o que reafirma o seu potencial inovador e de impacto na sociedade atual (Figura 5) (BAIG et al., 2021; LOURO et al., 2013).

Figura 5 – Aplicações industriais da nanotecnologia.



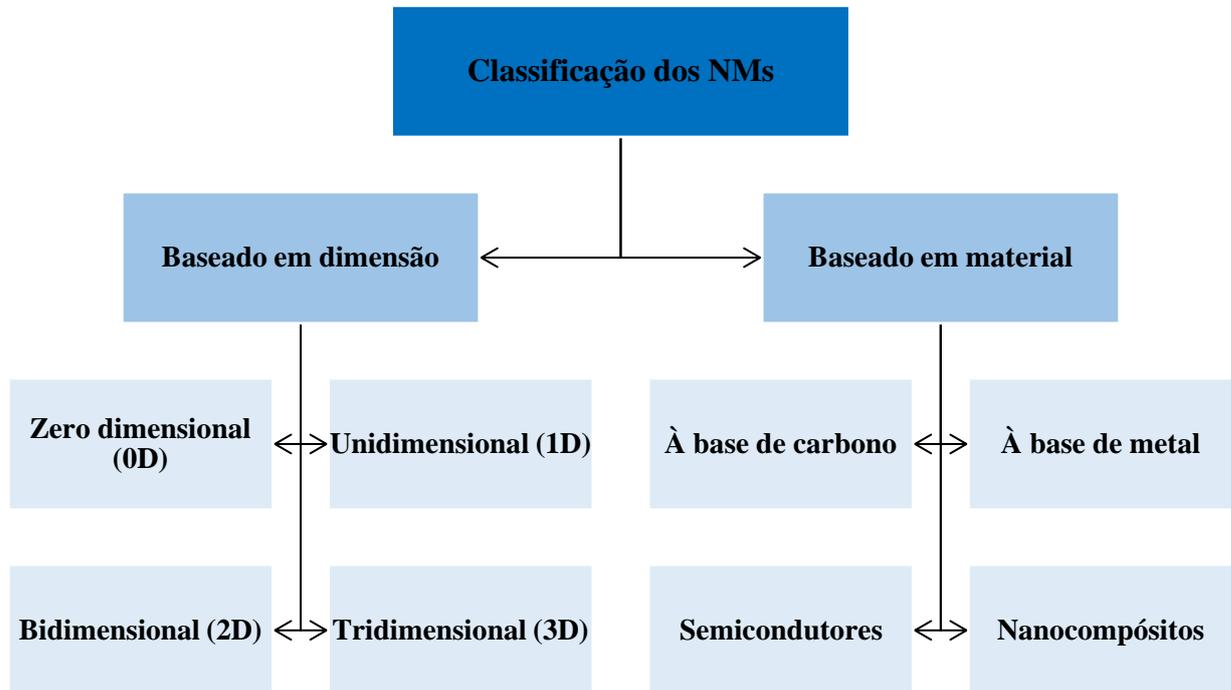
Fonte: Adaptado de MAPFRE Global Risks, 2022.

Interessante notar a diversidade de aplicações proporcionadas pelo desenvolvimento da nanotecnologia e perceber que, diante das possibilidades dos NMs projetados, destaca-se o emprego no âmbito dos catalisadores, os quais são substâncias bastante demandadas por variados segmentos industriais e utilizados com o intuito de aumentar a velocidade de uma reação química sem que sejam consumidos durante o processo (SHAH; POWERS, 2015).

1.1.2 Classificação dos nanomateriais

Fundamentado na morfologia, tamanho e forma, os NMs podem ser divididos em várias categorias, estabelecendo-se assim uma forma de classificação para esses materiais projetados (Figura 6) (ABID et al., 2022).

Figura 6 - Fluxograma de classificação dos NMs baseada em dimensão e material.



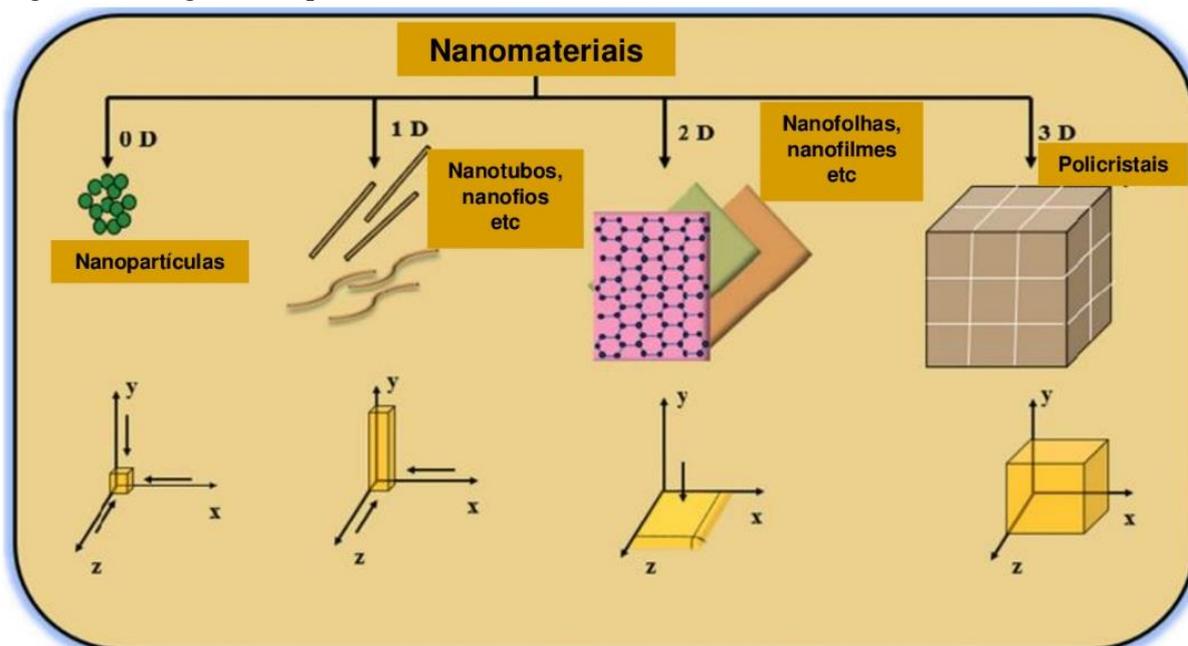
Fonte: Adaptado de ABID et al., 2022.

A classificação baseada na dimensão utiliza a importante propriedade da dimensionalidade para separar as diferentes estruturas de NMs, de maneira que ao menos uma de suas dimensões encontra-se na faixa de 1 a 100 nm (VASEGHI et al., 2020; SINGH et al., 2020). Assim, tem-se NMs 0D, 1D, 2D e 3D definidos da seguinte forma (Figura 7):

- Zero dimensional (0D): Em que todas as três dimensões de NMs estão na nanoescala. Exemplos incluídos nessa categoria são as NPs, pontos quânticos, nanoesferas, nanoaglomerados;
- Unidimensional (1D): Duas dimensões estão na nanoescala e uma última dimensão está fora dela. Exemplos incluídos nessa categoria são os nanobastonetes (NRs), nanotubos (NTs), nanofios (NWs);
- Bidimensional (2D): Uma das dimensões estará em nanoescala e as duas dimensões restantes estarão fora dela. Exemplos incluídos nessa categoria são os nanofilmes, nanocamadas, nanofolhas;
- Tridimensional (3D): Os NMs a granel, que são maiores que as dimensões em nanoescala, são os denominados NMs 3D. NMs 0D, 1D e 2D são blocos de construção em NMs 3D. Exemplos de estruturas que podem originar NMs

dessa categoria são os nanocompósitos, *core shells*, pacotes de nanofios, pacotes de nanotubos, multi nanocamadas.

Figura 7 - Diagrama esquemático de NMs baseados em dimensão.



Fonte: Adaptado de ABID et al., 2022.

A classificação baseada no material utiliza a informação da(s) substância(s) que compõe(m) o NM para fazer essa categorização. Os NMs à base de carbono, como o próprio nome diz, são elaborados de conteúdo de carbono e podem apresentar uma grande variedade de morfologias e de propriedades. Alguns dos diferentes tipos de NMs de carbono são fulerenos, nanotubos de carbono (CNTs), grafeno (GR), nanofibras de carbono e negro de fumo (EALIAS et al., 2017).

Já os NMs à base de metal são aqueles produzidos de metais, sendo íons metálicos bivalentes e trivalentes os insumos iniciais para obtenção dessas nanoestruturas metálicas. Estes possuem uma grande área de superfície e uma boa capacidade de adsorver moléculas pequenas, sendo aplicados em uma variedade de campos científicos, ambientais, entre outros (KOLAHALAM et al., 2019; EALIAS et al., 2017).

No que se refere à classe de NMs semicondutores, estes apresentam características metálicas e não metálicas e mostram diversas propriedades com lacunas de banda larga quando

são alterados, possuindo aplicações comuns em fotocatalise e aparelhos eletrônicos (KOLAHALAM et al., 2019).

A quarta e última classificação é dos NCs, considerados materiais híbridos em que pelo menos um dos componentes tem dimensões nanométricas (uma, duas ou todas), compondo assim uma substância sólida polifásica. Os componentes selecionados para formar os NCs desempenham funções complementares ou coesas entre si, garantindo materiais de alto desempenho com possibilidades de design únicas e combinações de propriedades e funcionalidade excepcionais. Comparado com compósitos tradicionais, os NCs possuem uma alta relação superfície-volume (KOLAHALAM et al., 2019; HADEF, 2018; BANIN et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2006).

Assim, a nanotecnologia destaca-se por proporcionar a utilização de todos os elementos da tabela periódica, obtidos através de insumos de origem sintética, aqueles produzidos artificialmente pelo homem, ou de origem natural, como fonte animal, vegetal ou mineral, o que viabiliza assim a aplicação dos NMs em quase todos os produtos fabricados por praticamente todos os segmentos industriais (BUSSINGER; TOSE, 2017). Visto que as possibilidades são variadas, a escolha do(s) componente(s) do NM desenvolvido será norteadada pelo tipo de aplicação e propriedades desejadas com o seu uso.

1.1.3 Síntese dos nanomateriais

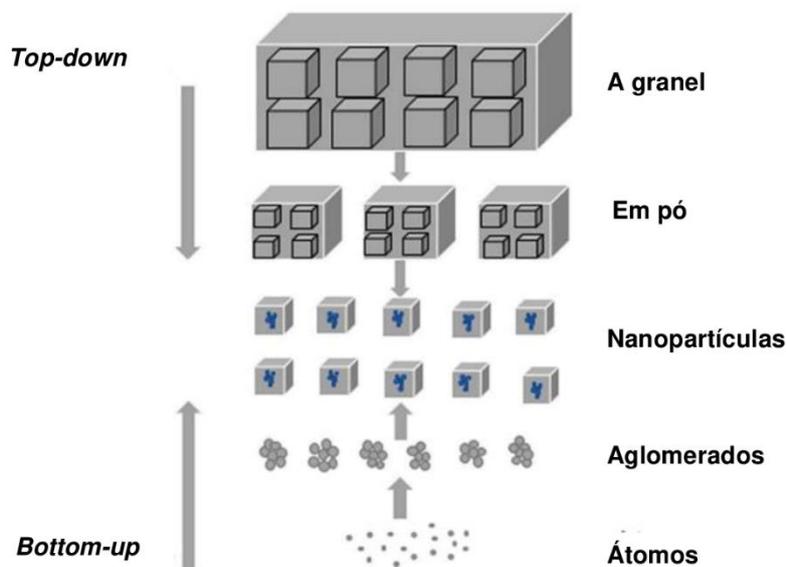
Nas últimas décadas, uma grande quantidade de pesquisas sobre a síntese de NMs tem sido desenvolvida, visto que um dos fatores predominantes no uso desses materiais e suas aplicações em vários campos, bem como para obter a estrutura e a morfologia desejada, é o mecanismo de síntese e crescimento das nanoestruturas. Dessa forma, um NM pode ter sido um bom candidato para uma certa aplicação, mas poderia ter maior utilidade em uma outra aplicação se sintetizado por um mecanismo e técnica diferentes (ABID et al., 2022).

Além disso, visto que as propriedades da NP dependem diretamente do seu tamanho e da sua forma, as rotas de síntese dos NMs devem ser capazes de garantir a estabilidade, uniformidade, tamanho médio controlado, distribuição de tamanhos semelhantes e não aglomeração (OLIVEIRA et al., 2005; AL-JOHANI et al., 2017; BANACH et al., 2017).

Top-down e *bottom-up* são duas formas de abordar a nanoescala. A abordagem *top-down* significa reduzir o tamanho da estrutura em direção à nanoescala, transformando o

material a granel em pequenas partículas nanométricas, enquanto a abordagem *bottom-up* é uma técnica construtiva de formação de grandes nanoestruturas a partir de átomos e moléculas menores (Figura 8) (Christian et al., 2008).

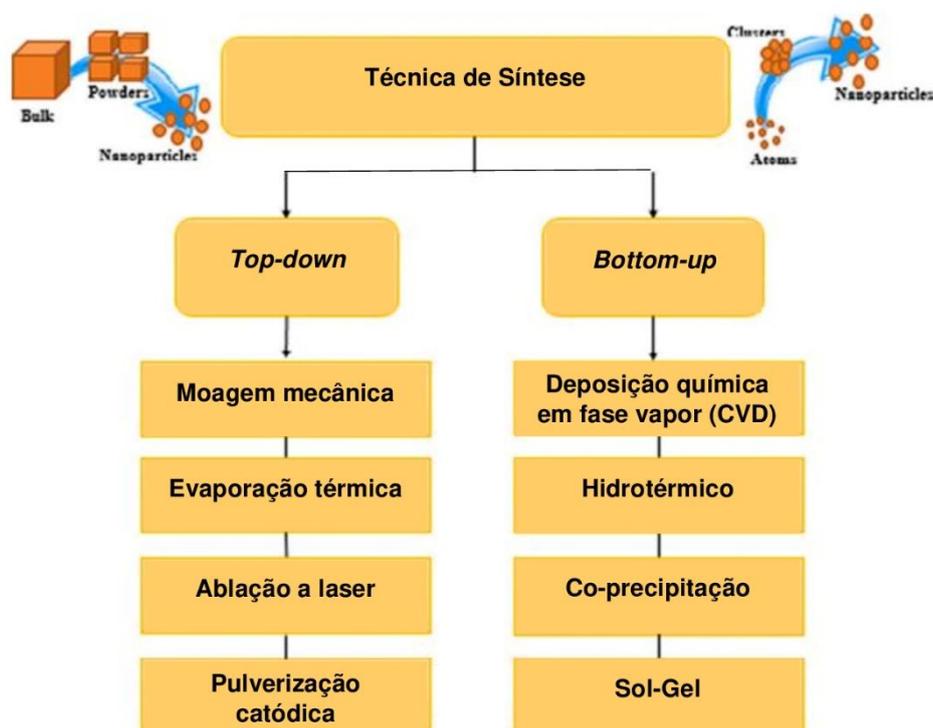
Figura 8 - As abordagens *Top-down* e *Bottom-up* para obtenção dos NMs.



Fonte: Adaptado de ABID et al., 2022.

As abordagens *top-down*, apesar de serem simples de usar, são ineficazes para a fabricação de partículas extremamente pequenas e de formato irregular, sendo a sua principal desvantagem a dificuldade em obter o tamanho e a forma adequados das NPs. Já nas abordagens *bottom-up*, NMs com forma, tamanho e composição química bem definidos são obtidos através do crescimento e automontagem de átomos e moléculas como seus blocos de construção (VASEGHI et al., 2020; KOLAHALAM et al., 2019; EALIAS et al., 2017; IJAZ et al., 2020; JAMKHANDE et al., 2019). Assim, compondo cada uma dessas abordagens existem diferentes técnicas de síntese possíveis e alguns exemplos podem ser verificados na Figura 9.

Figura 9 - Técnicas de síntese *top-down* e *bottom-up* para

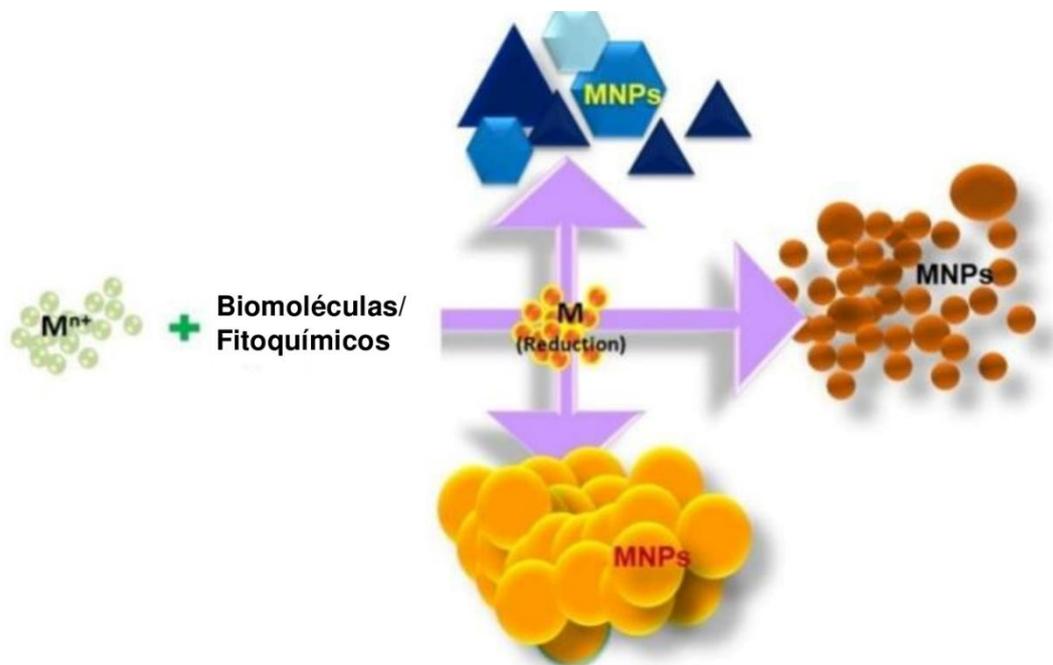


Fonte: Adaptado de ABID et al., 2022.

Dentre esses variados métodos físicos e químicos popularmente envolvidos na síntese das NPs, uma grande quantidade de solvente é necessária para a obtenção de partículas puras e bem definidas, além de outras substâncias (como polímeros, surfactantes) utilizadas para alcançar estabilidade e controlar forma e tamanho, o que torna essas técnicas caras e com elevado potencial de gerar problemas para o ecossistema e o meio ambiente (KUMAR et al., 2020; PRASAD et al., 2016; KUPPUSAMY et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2005).

Assim, objetivando superar os problemas enfrentados pelas técnicas convencionais, os chamados “métodos verdes” vêm ganhando espaço e o interesse dos pesquisadores, que estão se dedicando no desenvolvimento de estudos nessa área. Esses processos recorrem ao uso de vários materiais naturais, vegetais/biomoléculas, que proporcionam a geração de produtos e subprodutos ambientalmente amigáveis após a conclusão da síntese das NPs, possuindo assim as vantagens de serem seguros, baratos, ecologicamente corretos e facilmente ampliados para a produção em larga escala das NPs (SHANKAR et al., 2016). Adicionalmente, essas técnicas não demandam condições adversas, como alta temperatura, pressão e energia ou o uso de substâncias químicas tóxicas (Figura 10).

Figura 10 - Representação esquemática para a biossíntese de diferentes morfologias de NPs metálicas.



Fonte: Adaptado de KUMAR, 2021.

Extratos de plantas ou suas partes, como raízes, folhas, frutos, flores, cascas e sementes, são alguns dos exemplos de materiais que têm sido extensivamente selecionados devido às suas capacidades de proporcionar a biossíntese de diferentes tipos de NPs metálicas (MNPs), NPs de óxidos e NPs de calcogeneto (RAHMAN et al., 2020).

Apesar dos métodos verdes não estarem sendo aplicados na produção em larga escala atual das NPs, visto que esses desenvolvimentos ainda estão em fase inicial, muito se recomenda a continuidade e avanço dessa tecnologia devido aos benefícios potenciais de simplicidade e sustentabilidade envolvidos (NASROLLAHZADEH et al., 2019).

1.1.4 Aplicação dos nanomateriais no tratamento de águas residuais

Uma água de elevada qualidade é de fundamental importância para a maioria dos processos industriais, porém muitas dessas produções geram grandes volumes de águas residuais contaminadas. Dessa forma, a nanotecnologia pode ser considerada uma solução “pequena” para muitos grandes problemas, trazendo inovação e novos benefícios em termos de

produtos e processos que possuem o potencial de proporcionar um tratamento de águas residuais industriais mais eficiente e menos custoso, embora tecnologias promissoras devam ser demonstradas em escalas mais altas para causar um impacto real (JASSBY et al., 2018)

Como mostrado por Shah e Powers (2015), a nanotecnologia tem uma importante função para o desenvolvimento de um país em relação aos recursos renováveis, como a água e a energia, uma vez que são recursos de fundamental importância para a indústria de base principalmente. Portanto, essa tecnologia tem o potencial de ser mais sustentável e grande parte das pesquisas desenvolvidas nessa área de recursos hídricos envolvem materiais e processos simples e baratos.

O potencial de aplicação dos NMs projetados pode ocorrer em diferentes tipos de técnicas de tratamento de águas residuais industriais contaminadas, podendo ser destacado os processos de adsorção, membrana, filtração, eletrossorção, eletrodiálise, fotocatalise, oxidação fotoeletroquímica, sonoquímica, fluido supercrítico, eletrooxidação, eletrorredução, ozonização, à base de peróxido de hidrogênio, Fenton, à base de persulfato, biológicos, entre outros. Diante disso, a fim de elucidar essa variedade de aplicações dos NMs, serão abordados alguns dos estudos desenvolvidos recentemente por pesquisadores.

Adsorção

Catherine et al. (2018) estudaram a aplicação de nanoflocos de óxido de grafeno (GO) para a adsorção de diferentes contaminantes, como fenol, 4-clorofenol, 2,4-diclorofenol, 2,4,6-triclorofenol, bisfenol A, 4-nonilfenol e tetrabromobisfenol. Já Puri e Sumana (2018) relatam em seu estudo a adsorção do corante cristal violeta catiônico (CV) em nanocompósitos de montmorillonita (argilomineral) intercalados com óxido de grafeno (GO), que mostram excelentes resultados, adsorvendo 96% do corante CV com uma capacidade de 746,27 mg/g. (CATHERINE et al., 2018; PURI; SUMANA; 2018).

Filtração

Liu, Zhu et al. (2018) relatam a preparação de meios filtrantes de areia de quartzo superhidrofóbicos por revestimento superficial de nanopartículas de ZnO e octadeciltriclorossilano (OTS) para remoção de óleo de águas residuais.

Eletrossorção

Chen et al. (2018) abordaram em seu estudo a dessalinização da solução de NaCl pelo processo de deionização capacitiva (CDI) usando um eletrodo de carvão ativado (AC) modificado por NPs de prata (AgNPs). O eletrodo AC modificado apresentou maior hidrofiliabilidade e maior capacidade de desinfecção.

Membrana

Venault et al. (2018) avaliaram a separação de tolueno, hexano, diesel e soja de emulsões óleo/água usando membranas combinadas de óxido de grafeno (GO) e poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF). O resultado mostrou que as membranas carregadas com GO aumentaram a eficiência de separação em 8 a 10 vezes. Já Wang, Liu et al. (2018) investigaram a remoção de produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais usando membranas compostas nanotubos de carbono e óxido de grafeno reduzido (CNT-rGO). Os resultados mostraram que a deposição uniforme de CNT na camada de rGO da membrana atingiu 76%-100% de remoção das substâncias avaliadas.

Fotocatálise

Rani e Shanker (2018) abordam em seu estudo a degradação do azul de metileno (MB) em nanocompósitos de poli(metil metacrilato)/óxido metálico (Fe_3O_4 -PMMA, ZnO-PMMA, CuO-PMMA e Ni_2O_3 -PMMA) sob luz solar. Os resultados indicaram que a eficiência de degradação da cor seguiu a ordem: ZnO-PMMA (99%) > Ni_2O_3 -PMMA (98%) > CuO-PMMA (93%) > Fe_3O_4 -PMMA (90%). Já no estudo de Shandilya et al. (2018), foi avaliado a remoção de fenol e 2,4-dinitrofenol (DNP) sobre o fotocatalisador SV/FG24 preparado a partir de grafeno dopado com flúor (FG24) revestido com NPs de SmVO_4 (SV). O catalisador SV/FG24 apresentou um *band gap* baixo de 2,28 eV e alta área superficial, e exibiu capacidade significativa de adsorção e fotocatalise. O SV/FG24 também exibiu capacidade de desinfecção bacteriana fotocatalítica. Na pesquisa de Espinosa et al. (2018) foi investigada a degradação do fenol utilizando um fotocatalisador, preparado com nanopartículas de óxido de ferro (Fe-ox NPs) suportadas em nanopartículas de diamante hidroxilado (D3). A irradiação de luz visível melhorou substancialmente a reação Fenton heterogênea na presença de peróxido de

hidrogênio (H_2O_2) e das NPs Fe-ox/D3. O Fe-ox/D3 teve maior estabilidade e reciclabilidade do que catalisadores análogos de Cu/D3 e Ag/D3.

Oxidação fotoeletroquímica

Isaev et al. (2018) relataram a oxidação do corante preto direto (*direct black 22*) utilizando uma matriz de nanotubos de TiO_2 cultivada em uma placa de metal de titânio como eletrodo de trabalho. Já Turolla et al. (2018) investigaram em seu estudo a degradação fotoeletrocatalítica do corante vermelho reativo 243 (*Reactive Red 243*: RR243) em dióxido de titânio nanotubular (TiO_2) imobilizado em substrato condutor de malha. A descoloração e mineralização do RR243 atingiram 90% em 45 min e 60% em 100 min, respectivamente.

Sonoquímica

Khataee et al. (2018) demonstraram a remoção de violeta básico 10 (BV10) sob irradiação ultrassônica na presença de um sonocatalisador de nanofolha de dissulfeto de tungstênio (WS_2). A remoção máxima de BV10 foi de 94% na presença de 1 g/L de catalisador e 10 mg/L de BV10 sob potência ultrassônica de 400 W em 150 min em pH 4,5. Já Hassani, Karaca, et al. (2018) relatam no estudo a investigação da remoção do BV10 pelo processo sono-Fenton heterogêneo na presença de magnetita nanométrica (Fe_3O_4). Os resultados mostraram 75,94% de remoção de BV10 sob condições ótimas em 120 min.

Fluido supercrítico

Golmohammadi et al. (2018) abordaram em seu desenvolvimento a oxidação catalítica de tributil fosfato (TBP) usando água supercrítica (SCW) na presença de um nanocatalisador de CeO_2 . O uso do catalisador CeO_2 aumentou a eficiência de remoção do carbono orgânico total (TOC) em 22%.

Eletrooxidação

Pourzamani et al. (2018) estudaram a eletrooxidação do diclofenaco (DCF) em um eletrodo de Ti/RuO_2-TiO_2 na presença de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT) em um reator eletroquímico tridimensional (3DE). Os resultados mostraram que os eletrodos

MWCNT e Ti/RuO₂-TiO₂ exibiram alta atividade electrocatalítica e eficiência de remoção. Já Ridruejo, Alcaide et al. (2018) e Ridruejo, Centellas *et al.* (2018) abordaram nos estudos o tratamento da tetracaína anestésica em solução aquosa por oxidação eletro e fotoeletro-Fenton usando um cátodo de difusão de ar embutidas com NPs de CoS₂. Os resultados mostraram que as NPs de CoS₂ aumentaram a eficiência de oxidação da tetracaína.

Eletrorredução

Sun et al. (2018) demonstraram em seu estudo a redução electrocatalítica de NO⁻³ e NO⁻² em eletrodos de óxido de grafeno reduzido (rGO) carregados com nanopartículas monodispersas de cobre (Cu), paládio (Pd), platina (Pt) e ródio (Rh).

Eletrodiálise

Caprarescu et al. (2018) relataram a síntese de uma membrana polimérica de nanopartículas de álcool polivinílico-SiO₂ para serem aplicadas em um sistema de electrodiálise para a remoção de íons metálicos, corantes, colóides orgânicos ou inorgânicos, bactérias ou outros microrganismos de diferentes águas naturais e efluentes.

Ozonização

Yang, Peng, et al. (2018) investigaram em seu trabalho a ozonização (O₃) catalítica do ácido salicílico usando nanocompósitos de TiO₂ modificados com ZnO (Zn-TiO₂) com e sem sistemas de O₃ e UV/O₃/Zn-TiO₂. O resultado mostrou que Zn-TiO₂ com 7% de Zn exibiu a maior remoção do carbono orgânico total (TOC). Além disso, mostrou-se que a eficiência de degradação do sistema UV/O₃/Zn-TiO₂ foi maior que a do sistema UV/Zn-TiO₂ e O₃.

Processos à base de peróxido de hidrogênio

Ma, Cheng, et al. (2018) abordaram a remoção de norfloxacin (NOR) da água usando cobre zerovalente nanométrico (nZVC) sob irradiação de ultrassom (US-nZVC) e na presença de H₂O₂ (H₂O₂-nZVC). A eficiência de degradação do NOR aprimorada por ultrassom atingiu níveis significativamente acima de 90%.

Processos Fenton/Tipo Fenton

Arshad et al. (2018) relataram a remoção de laranja de metila (MO) da água pelo processo foto-Fenton na presença de nanocompósitos de grafeno/Fe₃O₄. Os resultados mostraram que o sistema exibiu mais de 99% de remoção do MO, sendo maior do que o sistema usando apenas catalisador Fe₃O₄ (a 43%). O sistema ainda rendeu mais de 95% de remoção do MO mesmo após cinco ciclos. Já no estudo do Jiang et al. (2018) foi abordado a remoção do verde de malaquita (VM) da água pela reação de foto-Fenton sobre nanofolhas de magnetita (Fe₃O₄). Os resultados mostraram que o sistema exibiu 99,9% de remoção do VM em 60 min. Além disso, o sistema Fe₃O₄-H₂O₂ ainda rendeu mais de 75% de remoção do VM mesmo após cinco ciclos.

Processos à base de persulfato

Zhou et al. (2018) investigaram a oxidação de 2,4-diclorofenol (2,4-DCP) por persulfato (PS) e peroxomonossulfato (PMS) sobre ativadores de cobre zerovalente (ZVC) e cobre nano-zerovalente (nZVC). Os resultados mostraram que o PMS teve um desempenho melhor do que o PS em 10 a 30 vezes na degradação de 2,4-DCP. O ZVC/PMS e o nZVC/PMS exibiram 56,7% e 45,3% de remoção do carbono orgânico total (TOC), respectivamente.

Processos biológicos

Wang, Song et al., (2018) relataram em sua pesquisa que NPs de paládio (Pd(0)) geradas por *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 em condição fermentativa e localizadas na membrana celular melhoraram a redução de corantes azo.

Assim, as possibilidades de aplicação dos NMs projetados nas mais diversas técnicas de tratamento de águas residuais industriais ficam evidentes. As aprimoradas propriedades que os elementos apresentam em nanoescala são de fundamental importância para permitir a vasta faixa de novas aplicações, novos materiais e novas tecnologias, proporcionando não só sistemas de tratamento eficientes e rápidos, mas também econômicos, visto que uma menor quantidade de material é necessária para atingir os objetivos de performance do produto quando comparado com o mesmo material em maior escala, em função do aumento da área superficial na nanoescala e consequente elevação da reatividade do material. Dessa forma, permite-se

preservar os recursos naturais como a energia e reduzir os custos de operação, gerando, assim, benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a economia (SHATKIN, 2013).

Algumas vezes, para melhorar a eficiência do processo de tratamento, as NPs são dispersas em suporte, acopladas ou dopadas com metais ou adsorventes de alta porosidade. Os materiais de suporte mais utilizados são zeólitas, carvão ativado, filme de silício e materiais híbridos, que além de garantirem melhores performances do material também contribuem para melhores estabilidades e facilidade de recuperação, superando possíveis desafios e dificuldades quando se trata de materiais nanométricos destinados ao tratamento de águas residuais industriais (NDOLOMINGO et al., 2020; GAHLAWAT et al., 2019). Dessa forma, para garantir a adequada estabilidade das NPs e correta fixação ao suporte, a etapa de síntese é crucial para atingir esse objetivo e deve ser realizada modo preciso, pois, quando as NPs se ligam de forma ineficaz ao suporte, elas são facilmente descoladas após o primeiro uso e lavagem, gerando a perda do material e o potencial de contaminação secundária durante a aplicação da técnica de tratamento (AOUDJIT et al., 2018).

1.2 Corantes orgânicos sintéticos como espécies contaminantes

Os corantes e pigmentos são substâncias químicas obtidas de fontes naturais ou de maneira sintética, de origem orgânica ou inorgânica, intensamente coloridas e empregadas com o objetivo de colorir substratos diversos (ABIQUIM, 2006a; SHORE, 2002).

A humanidade recorre a atribuição de cor a objetos e tecidos desde o início da civilização, fazendo o uso dessas substâncias coloridas que eram obtidas de fontes naturais no princípio, especialmente de origem vegetal e animal. Os relatos na literatura datam de 2000 a. C. a prática do tingimento pela civilização fenícia (KING; STAGER, 2002).

Com o passar de milhares de anos, foi possível o desenvolvimento e obtenção de substâncias sintéticas que promovessem de forma mais eficiente e com maior qualidade o processo de tingimento, feito atribuído ao químico inglês em William Henry Perkin em 1856 (HUNGER, 2003; ZOLLINGER, 2003). Assim, a partir de 1861 iniciou-se a produção em larga escala dos corantes e pigmentos orgânicos sintéticos, com milhares de diferentes tipos disponíveis comercialmente atualmente (GUARATINI et al., 2000; ZOLLINGER, 2003).

Dessa forma, esses compostos sintéticos passaram a ser recorridos em substituição aos de origens naturais fundamentado pelo fato de possuírem menor custo de produção, extensa

possibilidade de síntese com grupos funcionais diferenciados (que aumentam a diversidade de cores e tonalidades), maior grau de pureza, controle da fidelidade da cor e maior fixação, sendo assim amplamente utilizados em várias áreas, destacando-se setores industriais como o têxtil, farmacêutico, cosméticos, plásticos, couro, fotografia, automobilístico, papel e alimentício (ZANONI; YAMANAKA, 2016; RAUF et al., 2012; ZOLLINGER, 2003).

O Colour Index, publicado pela Society of Dyers and Colorists (SDC) e pela American Association of Textile Chemists and Colorists (AATCC), contém em sua última edição uma relação de mais de 34.500 corantes e pigmentos produzidos em larga escala e destinados as mais variadas aplicações, além de 11.570 produtos catalogados pelo nome comercial (COLOUR INDEX, 2014).

De maneira frequente, os termos corantes e pigmentos são confundidos ou utilizados erroneamente como sinônimos, mas existem diferenças fundamentais entre eles acordadas internacionalmente por meio de várias organizações. Segundo a Color Pigments Manufacturers Association, Inc. (CPMA), pigmentos são particulados sólidos orgânicos ou inorgânicos, coloridos, pretos, brancos ou fluorescentes que geralmente são insolúveis no veículo ou no substrato ao qual estão incorporados e essencialmente não são afetados física e quimicamente, alterando a aparência por absorção seletiva e/ou espalhamento de luz. Os pigmentos são geralmente dispersos em veículos ou substratos para aplicação, como por exemplo na fabricação de tintas, plásticos ou outros materiais poliméricos, e retêm uma estrutura cristalina ou particulada durante todo o processo de coloração (COLOUR INDEX, 2021).

Já a definição de corantes, segundo a The Ecological and Toxicological Association of Dyes and Organic Pigments Manufactures (ETAD), estabelece que são substâncias orgânicas intensamente coloridas ou fluorescentes, que conferem cor a um substrato (têxteis, couros, papéis, cabelos, entre outros) por absorção seletiva de luz. São espécies solúveis e/ou passam por um processo de aplicação que, pelo menos temporariamente, destrói qualquer estrutura cristalina por absorção, solvatação e retenção mecânica, ou por ligações químicas iônicas ou covalentes (COLOUR INDEX, 2021).

Estima-se que o mercado mundial atual para esses compostos seja superior a 1 milhão de toneladas/ano, representando uma quantia de 12 a 13 bilhões de dólares distribuídos entre os corantes orgânicos e pigmentos orgânicos e inorgânicos (ZOLLINGER, 2003).

Os corantes orgânicos sintéticos possuem estruturas constituídas por grupos funcionais diversificados, os chamados grupos cromóforos, auxocromos e antiauxocromos. Os cromóforos são os responsáveis pela coloração apresentada pelo corante, que possuem absorção na região ultravioleta (UV) e visível (Vis) do espectro, principalmente por causa das transições

eletrônicas de um sistema conjugado de duplas ligações. Já os auxocromos e antiauxocromos contribuem na diversificação da cor atribuída ao corante, intensificando-a e/ou modificando-a. O conjunto dessas três entidades é denominada como cromogênio e a estabilidade da molécula do corante está diretamente associada à força da ligação química dos átomos que compõem esses grupos (ZOLLINGER, 2003; KIMURA et al., 1999).

Os corantes têxteis sintéticos podem ser classificados ao menos de duas maneiras, de acordo com sua estrutura química ou de acordo com o modo de fixação da molécula na fibra têxtil (corantes reativos, diretos, azoicos, ácidos ou aniônicos, catiônicos, à cuba, à tina, dispersos, pré-metalizados, branqueadores ópticos, entre outros) - (GUARATINI et al., 2000; ZOLLINGER, 2003).

Na abordagem de classificação do corante pela estrutura química, ou pelo seu grupo cromóforo, são encontradas diversas classes, sendo as mais relevantes os corantes azo; antraquinona; metalizados; indigoide; ftalocianinas; metina, polimetina e polienos; di e triarilmetanos; nitro e nitroso; e sulfurosos. Essa categorização pode ser considerada a mais apropriada, visto que dessa forma as substâncias são rapidamente identificadas por estarem agrupadas em classes que possuem características semelhantes (HUNGER, 2003; ZANONI; YAMANAKA, 2016). Nas Tabelas 2.1 e 2.2., a seguir, são exemplificadas essas classes de corantes com a representação das estruturas químicas a que estão associadas.

Tabela 2.1 – Classificação dos corantes baseada na estrutura molecular.

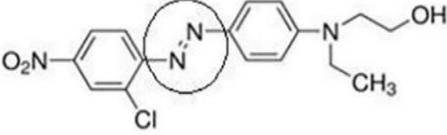
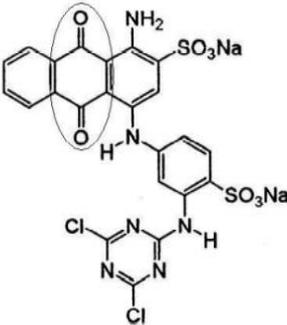
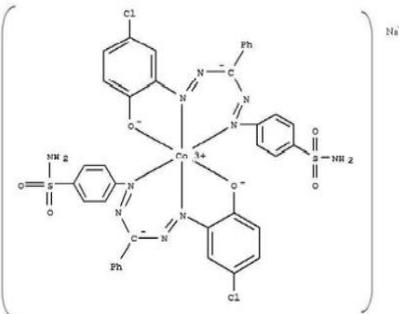
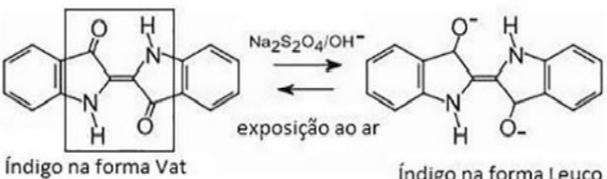
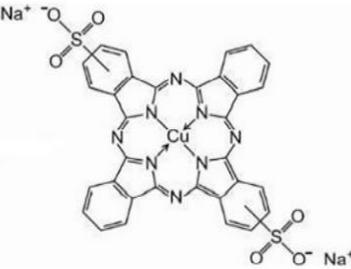
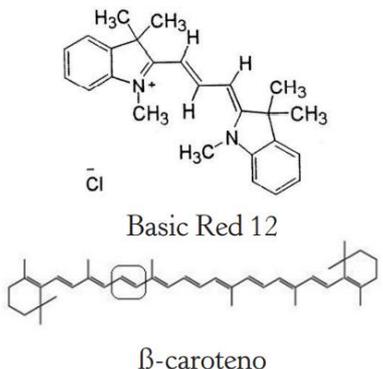
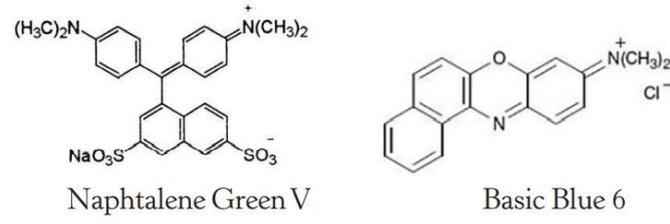
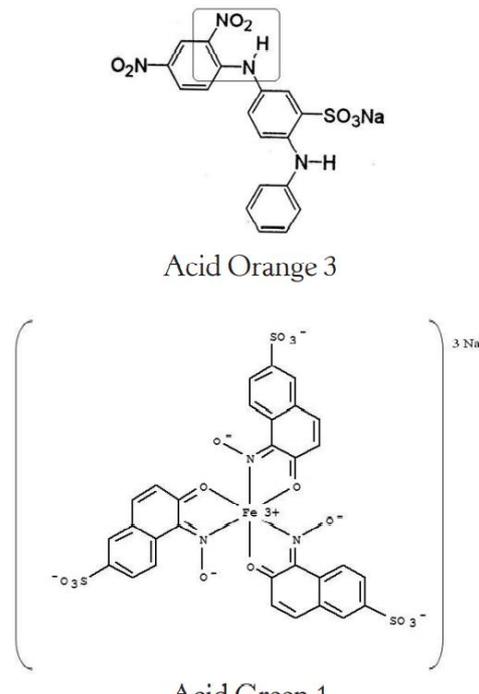
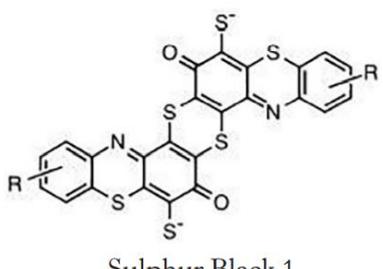
Cromóforo	Estrutura química (exemplos de corantes)
Azo	 <p style="text-align: center;">Disperse Red 13</p>
Antraquinona	 <p style="text-align: center;">Reactive Blue 4</p>
Metalizados	 <p style="text-align: center;">Acid Black 180</p>
Indigoide	 <p style="text-align: center;">Índigo na forma Vat Índigo na forma Leuco</p>
Ftalocianinas	 <p style="text-align: center;">Direct Blue 86</p>

Tabela 2.2 – Classificação dos corantes baseada na estrutura molecular.

Cromóforo	Estrutura química (exemplos de corantes)
Metina, polimetina e polienos	 <p style="text-align: center;">Basic Red 12</p> <p style="text-align: center;">β-caroteno</p>
Di e triarilmetina e oxazina	 <p style="text-align: center;">Naphtalene Green V</p> <p style="text-align: center;">Basic Blue 6</p>
Nitro e nitrosos	 <p style="text-align: center;">Acid Orange 3</p> <p style="text-align: center;">Acid Green 1</p>
Sulfurosos	 <p style="text-align: center;">Sulphur Black 1</p>

Dentre as várias classes de corantes destacadas, os azocorantes podem ser considerados a classe mais importante de corantes sintéticos disponível comercialmente para aplicações em diversos bens de consumo (alimentos, cosméticos, tecidos etc), além de representar mais de 65% dos corantes comerciais acessíveis e de possuir mais de três mil tipos diferentes (FORSS et al., 2011; ZANONI; YAMANAKA, 2016; BAFANA et al., 2011). Alguns exemplos representativos são, em inglês: Methyl Orange, Acid Orange 7, Acid Orange 20, Orange II, Methyl Red, Reactive Red 2, Reactive Orange 16, Reactive Black 5, Congo Red, Solvent Red 1, Direct Blue 160, Basic Yellow 15, Basic Blue 41, Disperse Orange 1, Disperse Red 1, Amido Black, Remazol Brilliant Orange 3R, Amaranth, entre outros (GUARATINI et al., 2000; SARATALE et al., 2011)

Os corantes azo são caracterizados por conter nitrogênio na forma do grupamento (-N=N-) como grupo cromóforo, que se encontra ligado a um carbono com hibridização sp^2 , como pode ser verificado na Tabela 2.1 anteriormente. Com relação ao número de grupamentos azo presentes na estrutura química, essas substâncias também podem ser referidas como monoazo, disazo, trisazo, entre outros. Acerca das espécies que esses grupamentos azo estão ligados, tem-se o anel de benzeno ou naftaleno principalmente, além de também ser possível grupos aromáticos heterocíclicos ou grupos alifáticos (HUNGER, 2003; ZOLLINGER, 2003).

A grande popularidade do azocorante acontece devido à facilidade e custo-benefício para a síntese em comparação com os corantes naturais, via diazotização, proporcionando uma diversidade de estruturas altamente conjugadas capazes de fornecer larga faixa espectral de cores e com propriedades físico-químicas desejáveis para ser aplicada nos diversos setores industriais (HUNGER, 2003; BAFANA et al., 2011; SEESURIYACHAN et al., 2007).

Devido à produção em grande escala e a ampla aplicação dos corantes orgânicos sintéticos, a perda dessas substâncias também é volumosa, tornando-se parte importante das águas residuais industriais geradas. Levando em consideração os variados setores que utilizam os corantes além da indústria têxtil, com as indústrias de papel, couro, cosmético, alimentos e farmacêutica, há uma estimativa que em torno de 15% da produção mundial dessas substâncias seja perdida para o meio ambiente, seja durante a síntese, o processamento ou a aplicação desses compostos, correspondendo a uma descarga média diária de 128 toneladas. Por exemplo, avalia-se que por volta de 1% a 2% são perdidos durante o processo de produção, por envolverem sínteses com até 500 etapas; e aproximadamente 20% a 50% dos corantes empregados no setor têxtil são perdidos devido a não fixação durante a etapa de tingimento, seguindo assim junto com a água de descarte (ZOLLINGER, 2003; ZANONI; YAMANAKA, 2016; ROBINSON et al., 2001; SARATALE et al., 2011).

O maior problema ambiental relacionado aos corantes é a sua adequada remoção dos efluentes. Visto que possuem estrutura complexa e ocorre a diversificação da matriz durante o processo de tingimento, muitos desses resíduos não conseguem ser tratados corretamente pelos processos convencionais, sendo assim capazes de provocar uma severa contaminação ambiental com riscos relevantes à flora e à fauna (ZOLLINGER, 2003; ZANONI; YAMANAKA, 2016; MOHAMMADIAN et al., 2010; SARAYU et al., 2012; PAPADOULOU et al., 2013; RAMAN et al., 2016).

Os corantes sintéticos, representados por um grande grupo de compostos químicos orgânicos, apesar de serem amplamente utilizados pelas indústrias e estarem presentes na vida diária da população, são considerados compostos potencialmente perigosos e capazes de induzir efeitos indesejáveis, tanto para o meio ambiente quanto para o ser humano. Diante disso, a ETAD, uma associação internacional independente para empresas produtoras de corantes, direciona seus esforços para avaliar corretamente e minimizar os impactos adversos dos corantes orgânicos na saúde humana e no ambiente provenientes de sua produção e suas aplicações, atuando no monitoramento de questões ecológicas e toxicológicas sobre essas substâncias, com o desenvolvimento de métodos adequados para determinação dessas espécies e propriedades de interesse (ZOLLINGER, 2003).

Apesar dos empenhos da ETAD em reduzir efeitos negativos dos corantes na saúde humana e no meio ambiente, segundo Frijters et al. (2006), a maioria dessas substâncias em águas residuais têxteis pode ser tóxica ou mutagênica e, frequentemente, não são totalmente eliminados nos processos de tratamentos de efluentes (CHEQUER et al., 2011). Umbuzeiro et al. (2005, 2004) e Alves de Lima et al. (2007) analisaram amostras de água coletadas no Ribeirão dos Cristais (São Paulo, Brasil), fonte hídrica utilizada para o abastecimento da população, e constataram elevada atividade mutagênica e capacidade de aumentar o número de lesões preneoplásicas em cólon de ratos causada pela presença de azocorantes e produtos de clivagem dessas espécies (aminas aromáticas) que ainda estavam presentes na água residual tratada (por lodo ativado) que uma indústria de tingimento lançava nesse corpo receptor.

Assim, de uma forma geral, os corantes comportam-se como os demais xenobióticos (substâncias químicas estranhas ao organismo humano), sendo capazes de provocar alterações bioquímicas e fisiológicas no organismo através de sua atividade intrínseca ou de seus produtos de metabolização, o que resulta na toxicidade, mutagenicidade e/ou carcinogenicidade dessas espécies químicas. As principais vias de exposição humana aos corantes são a oral, quando se faz a ingestão de água contaminada, alimentos ou medicamentos que contenham essas substâncias, e a dérmica, que ocorre pelo contato com esses compostos de tecidos e cosméticos

com a pele (ZANONI; YAMANAKA, 2016; UMBUZEIRO et al., 2005; COLLIER et al., 1993).

Além das questões ecológicas e toxicológicas, as águas residuais da produção de corantes e de empresas de tingimento podem ser bastante coloridas, sendo a remoção da cor desses compostos um dos problemas mais difíceis de solucionar e enfrentado pelas ETARs industriais, principalmente porque essas substâncias sintéticas foram concebidas para resistir a biodegradação, de tal forma que permanecem no ambiente durante um longo período de tempo. Mesmo em baixas concentrações de até 1 mg/L de corante, inferior a muitas outras espécies químicas presentes no efluente descartado, este pode gerar poluição perceptíveis e significativa nos corpos de águas, afetando a qualidade estética e a transparência da água e levando a danos irreparáveis ao ambiente aquático (CHEQUER et al., 2011; ZOLLINGER, 2003; AL-DEGS et al., 2000).

O controle governamental sobre a poluição ambiental na água e efluentes industriais, potabilidade, reuso, e outras, é cada vez mais rígido e monitorado, sendo no Brasil a regulamentação feita pelo Governo Federal, Estadual e Municipal. A nível Federal, segundo a normativa estabelecida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução N° 357, de 17 de março de 2005 - que dispõe sobre as condições, padrões, parâmetros e diretrizes para a gestão do lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora em corpos de águas receptores - é determinado as seguintes especificidades para a presença de corantes nas águas doces:

Art. 14° - As águas doces de classe 1 observarão as seguintes condições e padrões; I - condições de qualidade de água; e) corantes provenientes de fontes antrópicas: virtualmente ausentes (não perceptíveis pela visão, olfato ou paladar).

Art. 15° - Aplicam-se às águas doces de classe 2 as condições e padrões da classe 1 previstos no artigo anterior, à exceção do seguinte; I - não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais.

Art. 16° - As águas doces de classe 3 observarão as seguintes condições e padrões; I - condições de qualidade de água; e) não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam

removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais.

Para as empresas, isso significa que a água resultante dos seus processos deverá passar por tratamento antes de ser devolvida aos corpos hídricos, para eliminar ou neutralizar substâncias que possam alterar as características dos canais aquáticos, obedecendo assim às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis. Em todo caso, entre todas as legislações e decretos ambientais que cada Estado pode ter, a empresa geradora dos resíduos deve sempre considerar a legislação mais restritiva entre as esferas estadual, municipal e federal, visto que se faz sempre maior àquela que visa a plena proteção ao meio ambiente.

Portanto, as águas residuais industriais contaminadas com os corantes orgânicos sintéticos, uma vez lançados nos corpos de águas receptores sem o tratamento adequado, são uma grande preocupação pelo potencial de acarretar sérios problemas ambientais e também na saúde humana. Devido essas substâncias possuírem estruturas complexas e de natureza não biodegradável, além de a grande maioria ser considerada tóxica, mutagênica e cancerígena, e reduzirem a penetração da luz em sistemas aquosos, interferindo nos ciclos biológicos da biota aquática, especialmente no processo de fotossíntese e oxigenação, leva-se a um expressivo desequilíbrio do ecossistema de uma forma geral (SINGLA et al., 2014; KUNZ et al., 2002).

Diante desse cenário, o tratamento de águas residuais na presença de corantes tem despertado grande atenção para garantir um efluente final que atenda aos padrões previstos nas legislações ambientais, com muitos trabalhos sendo publicados a respeito, na busca de alternativas mais eficientes para remover a cor e esses compostos recalcitrantes (RAUF et al., 2011; CHEQUER et al., 2013; ALMEIDA et al., 2014).

1.2.1 Técnicas de tratamento para águas residuais industriais contaminados por corantes orgânicos sintéticos

O desafio de propor métodos de tratamento eficazes na remoção de corantes amplamente usados na indústria têxtil começa pela grande diversidade de corantes e das diferentes

propriedades físicas e químicas que estes possuem. Além disso, a seleção do processo ou da sequência de processos de tratamento depende de uma série de fatores, tais como: características iniciais do efluente, qualidade do efluente após o tratamento, custo, disponibilidade de área e tecnológica (ZANONI; YAMANAKA, 2016).

Em vista disso, o desenvolvimento de métodos que promovam a completa remoção e/ou degradação das substâncias corantes com grande eficiência não apresenta solução simples. A investigação de variadas técnicas de tratamento (primárias, secundárias e terciárias) vem ocorrendo, objetivando reduzir os danos provocados pelo descarte desses resíduos em águas superficiais. Os processos mais comumente empregados para remoção de compostos orgânicos em meio aquoso são os físicos, químicos e biológicos. Alguns exemplos de técnicas são: adsorção, floculação, coagulação química, sedimentação simples, lagoas de aeração, lodo ativado, filtros biológicos, osmose reversa, eletrodialise, entre outras.

Entretanto, algumas dessas técnicas não destroem os contaminantes, apenas transferem o contaminante não biodegradável de fase, resultando em um novo tipo de poluição, que requer tratamento adicional. Além disso, esses métodos são ineficazes na remoção de todos os tipos de corantes e outras substâncias químicas utilizadas pela indústria (GHALY et al., 2014; ROBINSON et al., 2001).

Os métodos tradicionalmente empregados e algumas das vantagens e desvantagens podem ser verificadas na Tabela 3 a seguir.

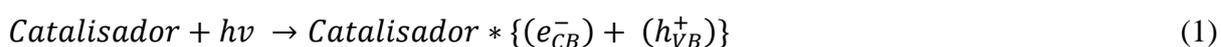
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens gerais dos métodos de remoção de corantes de águas residuais industriais atualmente em uso.

Método	Vantagens	Desvantagens
Peróxido de hidrogênio	É um oxidante ambientalmente amigável	Não é efetivo para todas as classes de corantes, pois seu potencial de oxidação não é muito alto
Reação de Fenton foto-Fenton	Descoloração efetiva e até mineralização de corantes solúveis e insolúveis, pois gera radicais hidroxila. A água pode até ser reusada após o tratamento	Geração de lodo e faixa ideal de pH para ser efetivo é estreita (2.0 a 3.0) o que pode ser melhorado pelo uso de complexos de ferro.
Ozonização	Aplicado em fase gasosa: sem alteração de volume. Muito eficiente para remoção de cor.	Tempo de meia-vida curto (20 min), não efetivo na mineralização e forma ácidos carboxílicos como produtos de degradação
Fotoquímico	Não há produção de lodo	Formação de subprodutos
NaOCl	Inicia e acelera rompimento de ligações azo, rápida descoloração, mais barato que outros oxidantes e facilmente aplicável	Risco de formação de hidrocarbonetos clorados e aumento de toxicidade
Degradação eletroquímica	Compostos gerados não são perigosos	Alto custo de energia
Carvão ativado	Boa remoção de grande variedade de corantes	Alto custo
Filtração por membrana	Remove todos os tipos de corantes	Produção de lodo concentrado
Irradiação UV	Oxidação efetiva em escala de laboratório, remove metais pesados. Combinação com um fotocatalisador, ozônio ou H ₂ O ₂ é eficiente, pois gera radicais hidroxila	São necessárias altas concentrações de O ₂ dissolvido, gera lodo e há problema devido ao espalhamento de irradiação UV
Degradação biológica	Alternativa econômica e eficiente na aplicação prática, trata efluentes de altas concentrações	Muitos corantes são estáveis e resistentes ao ataque microbiológico, mas o isolamento e adaptação de micro-organismos pode aumentar a eficácia da bioremediação.

Fonte: ZANONI; YAMANAKA, 2016.

Direcionando a atenção para as técnicas que levam à remoção total de moléculas de corante, a alternativa que se destaca na literatura são os processos oxidativos avançados (POAs), baseados na geração de radicais hidroxila ($^{\circ}OH$), que são espécies altamente oxidantes e não seletivas capazes de promover a degradação dos compostos orgânicos, e considerados de simples aplicação. Muitos são os processos existentes que possuem essa capacidade de gerar os radicais $^{\circ}OH$, sendo os mais comuns UV/H₂O₂, fotocatalise heterogênea/fotoeletrocatalise (TiO₂/UV), ozonização/ozonização catalítica, degradação eletroquímica e Fenton/foto-Fenton (Fe²⁺/H₂O₂), que possuem as vantagens de não produzirem resíduos no final do tratamento e de degradarem/oxidarem estruturas complexas, levando a subprodutos com menor toxicidade e até mesmo a mineralização completa das espécies contaminantes, ou seja, convertendo-os em água, CO₂ e íons inorgânicos (GHALY et al., 2014; PIGNATELLO et al., 2006).

Os processos fotocatalíticos heterogêneos já são reconhecidos como estratégias “verdes” e viáveis para problemas ambientais (GARRIDO-CARDENAS et al., 2020). O mecanismo básico deste processo é a adsorção de fótons de luz e a formação de buracos de elétrons (MAHDIANI et al., 2018). Para atingir a degradação dos corantes, esses processos geralmente envolvem três agentes ativos: radicais hidroxila ($^{\circ}OH$), radicais de ânion superóxido ($^{\circ}O_2^-$) e buracos (h^+) que participam de uma série de reações fotocatalíticas, descritas a seguir:



Apesar de existirem muitas publicações relacionadas aos POAs disponíveis na literatura, a adaptação desses processos ao tratamento de efluentes industriais em grande escala ainda é incipiente. Ampliar a eficiência desses sistemas requer um laborioso trabalho em função da

complexidade e do grande volume dos efluentes gerados, além da capacidade de armazenamento de cada indústria, sendo essas as variáveis a serem consideradas para alcançar um efluente final adequado para descarte no corpo receptor. Assim, os estudos mais recentes estão focados na busca por alternativas mais eficientes que garantam a transformação dos compostos recalcitrantes em substâncias não tóxicas e completa remoção da cor do efluente industrial (ZANONI; YAMANAKA, 2016; GALLO-CORDOVA et al., 2021).

1.3 Mercado global de nanomateriais catalíticos

Levando em consideração o maior destaque e interesse que as técnicas de tratamento de águas que garantem a degradação completa dos corantes orgânicos sintéticos recebem, fez-se um breve levantamento sobre as estimativas do mercado global atual dos NMs catalíticos, suas perspectivas de crescimento e as principais empresas envolvidas (*players*).

Segundo o relatório elaborado pelo 360 Research Reports (2022), prevê-se que o mercado global de nanocatalisadores aumente a uma taxa considerável durante o período de 2022 a 2028. Em 2021, o mercado apresentou uma taxa de crescimento constante e foi avaliado em US\$ 2.048,5 milhões. Com a crescente adoção de estratégias pelos principais *players*, espera-se que o mercado aumente significativamente no horizonte projetado. Assim, espera-se que o tamanho global do mercado de nanocatalisadores atinja US\$ 3.323,5 milhões em 2028, avançando a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 7,2 % ao longo do período.

Avaliando agora esse mercado com relação aos países detentores das tecnologias de produção, China e Estados Unidos constituem os maiores mercados do setor de nanocatalisadores no mundo, com impressionantes expectativas de crescimento até o ano de 2028. Outros mercados notáveis que estão projetados para apresentarem taxa de crescimento também consideráveis nos próximos anos são Alemanha, Japão e Coreia do Sul (360 RESEARCH REPORTS, 2022).

Os principais *players* globais de nanocatalisadores identificados, passíveis de aplicações no setor de tratamento de águas, podem ser verificados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Principais *players* globais de nanocatalisadores para o setor de tratamento de águas.

Empresa	Logomarca	País
TitanPE Technologies		China
KRONOS Worldwide		EUA
CRISTAL		Arábia Saudita
DK Nano <i>Technology</i>		China
Ishihara Sangyo Kaisha		Japão
Sakai Chemical		Japão
QuantumSphere		EUA
Hyperion Catalysis International		EUA
Mach I		EUA

Fonte: Adaptado de 360 RESEARCH REPORTS, 2022.

2 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA E *TECHNOLOGY ROADMAP*

Nesse capítulo pretende-se fornecer uma revisão bibliográfica sobre prospecção tecnológica e sobre a técnica do *technology roadmapping* (TRM), utilizando as informações e conhecimentos importantes já adquiridos sobre o tema.

Os conceitos apresentados estarão dispostos em duas seções: a prospecção tecnológica, em que é detalhado o conceito e alguns métodos disponíveis; e o *technology roadmapping*, no qual são mostrados o histórico sobre o tema, as definições e finalidades da técnica, formas de apresentação e os processos de aplicação do TRM.

2.1 Prospecção tecnológica

O conceito de prospectar é nortear ou direcionar algo para o futuro e o hábito de executar essa ação, de planejar o futuro, é algo intrínseco do ser humano.

No passado, a prospecção tecnológica era realizada de forma determinística majoritariamente, em que os dados históricos eram empregados para a realização das projeções. Com o passar dos anos, novos conceitos relativos às variáveis e às incertezas foram incorporados, visto que não estavam presentes nos dados já obtidos anteriormente, como novos contextos políticos, introdução de novas tecnologias e a presença de novos atores. Assim, no caso da prospecção tecnológica especificamente, pretende-se analisar o futuro de longo prazo da tecnologia, podendo ser explorado seu envolvimento com a economia e a sociedade (PIO, 2004).

Define-se a prospecção tecnológica como o processo de mapeamento dos desenvolvimentos tecnológicos e científicos capazes de influenciar e transformar uma indústria, a economia ou uma sociedade de forma significativa (KUPFER; TIGRE, 2004). Através da aplicação desse procedimento é possível uma compreensão mais completa das forças que moldam o futuro e que devem ser levadas em consideração na elaboração de políticas, no planejamento estratégico e nas tomadas de decisão acerca das inovações tecnológicas para todo tipo de organização. É uma das grandes dificuldades envolvidas na compreensão das

tendências, oportunidades e ameaças, que podem vir de encontro às instituições, é o elevado volume de informações que são disponibilizadas a todo momento (SANTO et al., 2006).

Atualmente, as constantes transformações e avanços tecnológicos despertam motivações nas empresas e governos a melhorarem o alinhamento de seus objetivos estratégicos de negócio com seu gerenciamento tecnológico (CARVALHO et. al., 2013). Tratando-se então da área tecnológica, fundamental para qualquer projeto de desenvolvimento do país, a demanda por estudos prospectivos é evidente, visto que as profundas mudanças tecnológicas ocorridas, especialmente nas duas últimas décadas, demonstram as muitas alterações que estão por vir e tornam imprescindível a compreensão das forças que irão guiar o futuro (COELHO, 2003). Assim, possuir uma visão direcionada para o que ainda está por vir possibilita construir um caminho orientado a uma melhor sustentabilidade e fortalecer a capacidade que um país tem de aproveitar as oportunidades futuras numa economia global.

Além disso, a importância de acompanhar continuamente as inovações tecnológicas, seja pelas empresas do setor privado ou público, é a aquisição da capacidade de conseguir se adaptar as mudanças externas de forma rápida e efetiva, que colabora assim não só para um melhor desempenho das atividades realizadas, mas também para o próprio desenvolvimento e continuidade da organização.

Dessa forma, notam-se os benefícios que podem ser gerados pelos estudos prospectivos nas organizações, sendo especificamente importante para empresas de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), como também relevante para os centros acadêmicos de pesquisa e produção científica.

Um grande exemplo de uma instituição do setor público que trabalha diretamente com estudos de prospecção tecnológica no Brasil é o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os estudos realizados periodicamente pelo CGEE abrangem temas de interesse público como energia, produtos renováveis, educação, agropecuária, setor alimentício, entre outros (CGEE, 2016).

Sendo assim, a fim de que as tendências e as informações mais relevantes possam ser agregadas pelo processo de prospecção tecnológica, é fundamental escolher uma ferramenta adequada que possa englobar todos os pontos cruciais e imprescindíveis para efetuar a análise desejada.

2.1.1 Métodos de prospecção tecnológica

São várias as ferramentas disponíveis que permitem esse alinhamento, utilizando a prospecção tecnológica como meio de aquisição das principais tendências dentro de um contexto mundial, antecipando e prevendo o comportamento de diferentes variáveis e suas interações, como socioeconômicas, políticas, culturais e tecnológicas (BORSCHIVER; SILVA, 2016). Mas não há uma formulação pronta para as metodologias de estudos prospectivos, havendo, frequentemente, a necessidade de envolver concomitantemente diferentes técnicas e métodos que podem ser classificados como quantitativos, qualitativos e semi-quantitativos (PORTER et al., 2004; POPPER, 2008).

Nos métodos quantitativos, são requeridas séries históricas confiáveis ou dados padronizados; e nos métodos qualitativos, é utilizado o conhecimento implícito de seu detentor, algo difícil de ser copiado e/ou transferido, existindo uma vulnerabilidade com relação à limitação desse conhecimento. A respeito dos métodos semi-quantitativos, estes utilizam características dos dois métodos, recorrendo a dados padronizados simultaneamente ao conhecimento de quem o detém.

No cenário internacional, os métodos clássicos de prospecção mais utilizados são a busca e análise de patentes e artigos científicos e os painéis de especialistas. A busca e análise dos documentos científicos é realizada através de pesquisas detalhadas em bancos de dados que contenham os registros, que são em seguida analisados de forma manual ou com o auxílio de programas computacionais específicos. Já o método de painéis de especialistas abrange a criação de eventos que possibilitam a troca de informações entre os especialistas da tecnologia em pauta, que fazem sugestões e compartilham opiniões em conjunto sobre o tema selecionado e, ao final, é possível estabelecer um único documento que reúne as observações realizadas (PORTER et al., 2004).

Atualmente, existem diversos novos métodos sendo continuamente criados e aprimorados, não estando limitados aos métodos clássicos, com o intuito de se adequarem às demandas específicas do mercado. Outros métodos frequentemente utilizados podem ainda ser divididos em nove “famílias”, que variam de acordo com o objetivo final e a forma como a informação é abordada (PORTER et al., 2004). São elas: Criatividade (e.g., Brainstorming), Métodos descritivos e matrizes (e.g., Matriz SWOT, *Roadmapping*), Métodos estatísticos (e.g., Análise de risco), Opinião de especialistas (e.g., Delphi), Monitoramento e sistemas de inteligência (e.g., Benchmarking), Modelagem e simulação (e.g., Análise de impacto cruzada),

Cenários (e.g., Cenários interativos), Análise de tendências (e.g., Curva de crescimento) e Avaliação/Decisão/Econômico (e.g., Análise Custo-Benefício).

O desenvolvimento de cada um dos métodos que compõe a grande diversidade existente ocorreu para satisfazer as demandas encontradas no momento de escolher uma ferramenta mais apropriada para analisar os acontecimentos futuros a respeito de uma tecnologia. Além disso, ainda há a possibilidade de adaptação de cada um desses métodos para cada estudo específico, o que causa variações dentro deles.

Dos métodos conhecidos de prospecção tecnológica o que mais se adapta ao objetivo principal deste trabalho é o *technology roadmapping*. Isto se deve ao fato do método buscar tendências tecnológicas e mercadológicas e atores envolvidos de um determinado setor industrial ao longo do tempo, de uma forma descritiva e detalhada, para complementar e suportar decisões estratégicas, como de investimentos e alocação de recursos de uma empresa/organização. Essa técnica é alocada na família de métodos descritivos e matrizes e é caracterizada como um método semi-quantitativo (PORTER et al., 2004; POPPER, 2008).

A metodologia aplicada nesse estudo ainda atua de modo a combinar a técnica de *roadmapping* com a técnica clássica de busca e análise de patentes e artigos científicos, de maneira a satisfazer as necessidades encontradas para o cenário em questão, nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos. A seguir, será aprofundado com maiores detalhes os conceitos relativos ao *technology roadmapping*, para melhor explicar, exemplificar e mostrar o potencial da técnica para o presente trabalho.

2.2 *Technology roadmapping* (TRM)

2.2.1 Histórico

O ex-presidente da Motorola de 1959 a 1986, Robert Galvin, designou o mapa elaborado através do método TRM como sendo "Uma visão prolongada no futuro de um campo de investigação composta a partir do conhecimento coletivo e imaginação dos mais brilhantes condutores da mudança" (DAIM; OLIVER, 2008). Com relação à aplicação do TRM, essa

organização foi a primeira a fazer sua utilização para descrever a evolução tecnológica dos rádios para carros no final da década de 70 (WILLYARD; MCCLESS, 1987).

Após ser empregado pelas empresas Motorola e Corning, a ferramenta do TRM passou a ser aplicada como técnica de planejamento estratégico em várias outras empresas, governos e instituições, públicas e privadas. No Japão, as empresas do setor de eletrônicos como a Sony, Sharp, Matsushita, Hitachi, Toshiba, NEC e Fujitsu, possuem *roadmaps* das suas atividades de pesquisa e desenvolvimento, almejando a garantia da realização dos seus objetivos e resultados esperados (JTEC, 1995).

No âmbito governamental, o caso de busca e planejamento estratégico é o Chinese Academy of Sciences que aplicou o TRM objetivando a projeção dos avanços em diferentes tecnologias até 2050 (WANG et al, 2012). Baseado nisso, foi elaborado um documento que suportará as tomadas de decisão dos pesquisadores, funcionários do governo e empresários nos sistemas básicos e estratégicos de desenvolvimento socioeconômico com o auxílio da ciência e tecnologia.

Outro exemplo é o Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia dos EUA, que recorreu à ferramenta em seu plano nacional para pesquisa e desenvolvimento, desenvolvendo mapas para segurança, eficiência e compatibilidade ambiental da aviação no país (NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL, 1999). No caso do Daim e Oliver (2008), foram realizados estudos de introdução do TRM como rotina de planejamento tecnológico para a área de serviços energéticos dos EUA.

A National Aeronautics and Space Administration (NASA) estabeleceu uma prática do TRM quando apresentou um conjunto de 14 *roadmaps* para nortear o desenvolvimento das tecnologias relacionadas ao espaço (NASA, 2010). Estes tiveram ampliações e atualizações em 2012, e a mais recente em 2015, fornecendo um total de 15 *roadmaps* que abrangem temáticas diversas, como robótica e sistemas autônomos, nanotecnologia e aeronáutica (NASA, 2015).

2.2.2 Definições

Com a disseminação da técnica do TRM, a nomenclatura empregada, assim como sua definição, têm sido referidas sob diferentes formas (KAPPEL, 2001). Alguns exemplos dos termos encontrados são “*technology roadmapping*”, “*technology roadmap*”, “*roadmapping*” ou simplesmente “*roadmap*” em inglês (LEE; PARK, 2005) e “Mapas de Rotas Tecnológicas”

(LARAIA, 2015), “Roadmap Tecnológico” (BORSCHIVER et.al. 2014), “Mapas Tecnológicos” (DIDIO, 2011) ou “Mapeamento Tecnológico” (FRANCO, 2009) em português. Entretanto, percebe-se especialmente a aplicação do termo *technology roadmapping* para descrever a técnica. Uma forma simples de diferenciar é fazer a utilização do termo “*roadmapping*” ou mapeamento para se referir ao processo especificamente, e do “*roadmap*” ou mapa para definir o documento gerado ao final do processo (GARCIA; BRAY, 1997; KAPPEL, 2001). Dessa forma, nesse presente estudo serão empregados os termos *technology roadmapping* (TRM) para o método e *technology roadmap*, ou apenas *roadmap*, para fazer referência ao mapa final.

O TRM é considerado uma técnica de planejamento estratégico, direcionada para o futuro, que auxilia no entendimento das conexões existentes entre tecnologias, produtos e mercado ao longo do tempo. Além disso, é de extrema importância detectar tecnologias emergentes, que sejam melhorias ou tecnologias disruptivas, para garantir a permanência em mercados de grande dinâmica tecnológica (PHAAL et al., 2004).

Outra consideração sobre a ferramenta do TRM, segundo Phaal et al. (2008), é a sua relevância para planejamentos iniciais que abrangem inovação, visto que é nesse instante que as tomadas de decisão cruciais têm potencial de afetar a organização a longo prazo.

Já para Garcia e Bray (1997), a técnica é de fundamental importância para os planejamentos tecnológicos dos setores empresariais e industriais, permitindo a geração de planos de ação para a organização a partir da identificação das necessidades críticas para os produtos e das suas possíveis alternativas, além da seleção das opções tecnológicas adequadas.

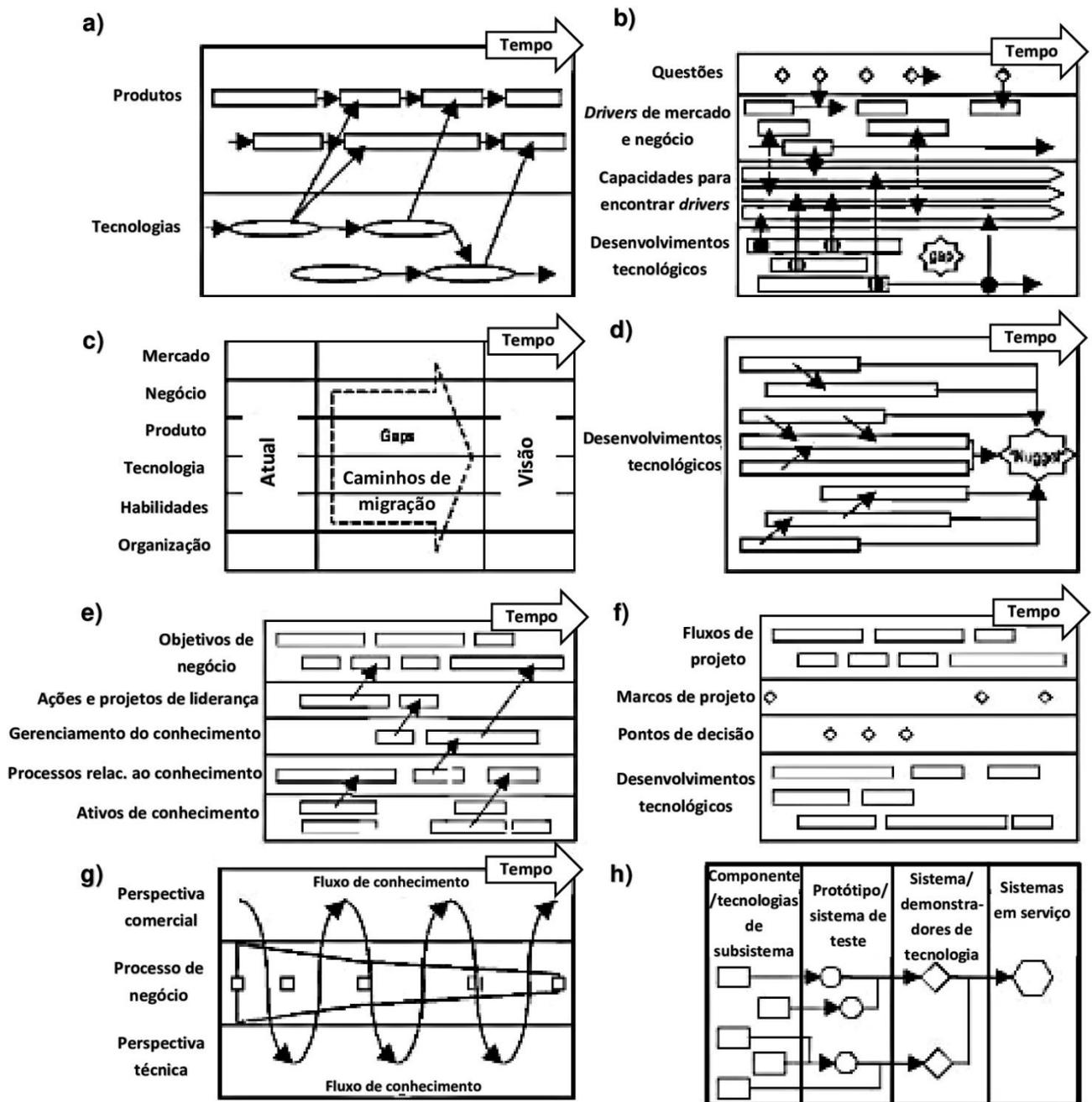
2.2.3 Formas de apresentação

O TRM permite a representação visual e simplificada, na forma de um mapa tecnológico, da estratégia a ser estudada e tomada, desempenhando assim a função de um meio de comunicação que mostra a localização atual e onde se pode ir de forma clara e útil a qualquer um dos cargos de uma empresa (PHAAL; MULLER, 2009; DAIM; OLIVER, 2008). Desse modo, é possível atuar auxiliando a gestão do futuro das tecnologias, bem como o desenvolvimento e a implementação de planos estratégicos integrados de negócios, produto e tecnologia da organização (PHAAL, FARRUKH; PROBERT, 2004).

As formas e abordagens existentes de *roadmaps* são variadas, mas normalmente compreendem uma representação gráfica em multicamadas fazendo uma conexão entre tecnologia e produtos com as oportunidades de mercado, levando em consideração as alterações no ambiente associadas conforme o tempo (PROBERT, FARRUKH; PHAAL, 2003). Além dos elementos de mercado, produto e tecnologia, o *roadmap* pode incluir informações sobre recursos, como financeiros, funcionários e fornecedores, e programas de P&D. Outro aspecto a ser ressaltado é o dinamismo do mapa obtido, onde mudanças ocorrem com o passar do tempo, visto que novas tecnologias e produtos aparecem a toda hora no mercado. Dessa forma, a organização deve continuamente manter o *roadmap* atualizado com relação ao tempo, para que se tenha um propósito que produz resultado.

A partir de uma análise de aproximadamente 40 *roadmaps* feita por Phaal; Farrukh e Probert (2004), foi possível identificar diferentes formatos gráficos que eram utilizados conforme o propósito do estudo (Figura 11).

Figura 11 - Exemplos de tipos de *technology roadmaps*, relativos a planejamento de: a) produto, b) serviço/capacidade, c) estratégia, d) longo prazo, e) ativos de conhecimento, f) programa, g) processo, h) integração.

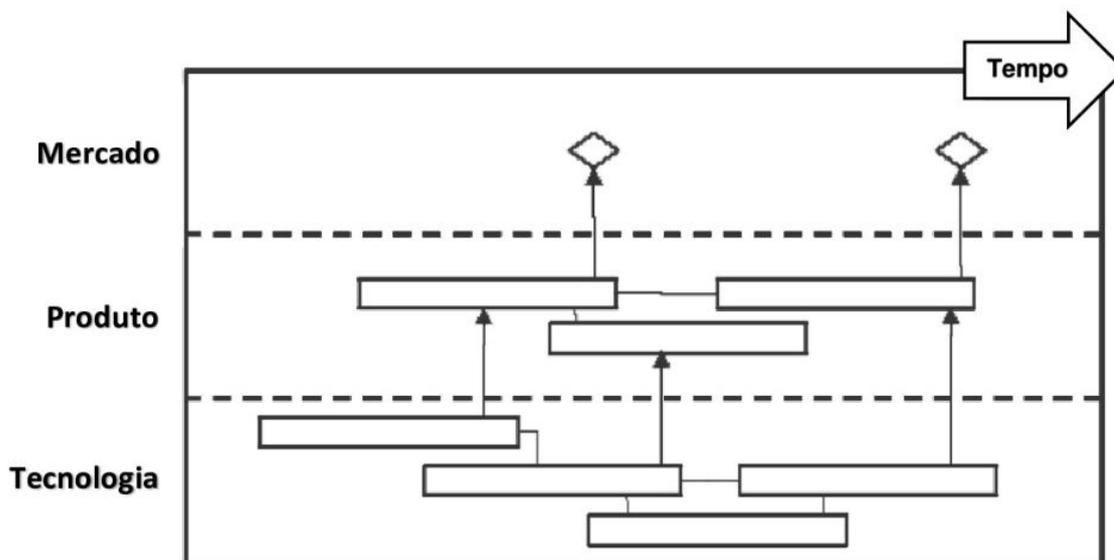


Fonte: Adaptado de PHAAL et al., 2004.

Nota-se que a técnica de TRM possui bastante flexibilidade e é adaptável a diferentes objetivos, que geralmente guiarão a forma como as informações serão apresentadas no modelo de um mapa.

A European Industrial Research Management Association (EIRMA, 1997), uma associação internacional sem fins lucrativos, sugeriu uma forma genérica para os *roadmaps*, sendo este o formato mais frequentemente adotado (PHAAL et al., 2004). Esse modelo apresenta o aspecto de um retângulo, segmentado em três camadas que designam as perspectivas de mercado, produto e tecnologia, com a variação do tempo pelo eixo horizontal (Figura 12). Nesse esquema genérico é mostrado como a tecnologia pode ser alinhada ao desenvolvimento de produto e serviço, estratégia de negócio e oportunidades de mercado.

Figura 12 - Esquema genérico de um technology raodmap proposto pela EIRMA em 1997.



Fonte: Adaptado de PHAAL et al., 2004.

2.2.4 Os processos de aplicação do TRM

Diversos estudos são realizados por diferentes pesquisadores para estabelecimento dos processos de aplicação do TRM, uma vez que o *technology roadmapping* refere-se não a uma técnica específica, mas a um conjunto de técnicas e abordagens similares.

A proposta feita por Garcia e Bray (1997) é composta por uma série de procedimentos divididos em três fases: fase preliminar, desenvolvimento do *roadmap* e atividade de acompanhamento (Tabela 5).

Tabela 5 - Fases do processo de aplicação do technology roadmapping segundo Garcia; Bray, 1997.

1ª Fase:	a. Satisfazer as condições essenciais.
ATIVIDADE PRELIMINAR	b. Estabelecer liderança/patrocinador. c. Definir o escopo e limites para o <i>technology roadmap</i> .
2ª Fase:	a. Identificar o “produto” que será foco do <i>roadmap</i> . b. Identificar os requerimentos críticos do sistema e seus propósitos. c. Especificar as áreas tecnológicas fundamentais. d. Especificar os direcionadores tecnológicos e seus alvos. e. Identificar as alternativas tecnológicas e suas linhas do tempo. f. Recomendar as alternativas tecnológicas que devem ser almejados. g. Criar o relatório do <i>roadmap</i> .
DESENVOLVIMENTO DO TECHNOLOGY ROADMAP	
3ª Fase:	a. Criticar e validar o <i>technology roadmap</i> . b. Desenvolver o plano de implementação. c. Revisar e atualizar.
ATIVIDADE DE CONTINUIDADE	

Fonte: Adaptado de GARCIA; BRAY, 1997.

Segundo a abordagem desenvolvida por Phaal et al. (2001), as ferramentas empregadas para se obter as informações são as opiniões de especialistas, reunidas em vários de workshops. A elaboração do mapa e a determinação das estratégias e ações a serem tomadas pela organização são realizadas ao final do processo, no último workshop.

A metodologia adotada por Meissner et al. (2013), estabelece duas formas fundamentais de abordagem para a técnica do TRM. Uma é a prática orientada para o mercado, em que o primeiro fator analisado no estudo é a demanda existente, e a outra é o modelo orientado para a tecnologia, no qual são indentificadas as tecnologias primeiramente, seguido da análise das demandas cujas tecnologias poderiam se adequar.

Os variados modelos de TRM relatados por Zhang et al. (2016) tiveram seus desenvolvimentos baseados em uma abordagem híbrida das técnicas qualitativas (como entrevistas e workshops) e quantitativas (como o uso de softwares). Os pesquisadores justificam que essa associação é necessária a fim de que se tenha a capacidade de lidar com a complexidade e emergência existentes em planejamentos estratégicos e tomadas de decisão.

Na metodologia desenvolvida por Borschiver e Silva (2016), as informações necessárias para realização do TRM são obtidas a partir de documentos científicos, como artigos e patentes, ao invés de consultas diretas a especialistas (workshops) (BORSCHIVER et al., 2014). Os

autores descrevem o processo de aplicação do TRM em três fases bem definidas: Fase Pré-prospectiva, Fase de Prospecção Tecnológica e Fase Pós-prospectiva. Na etapa pré-prospectiva, são obtidos os conhecimentos já aprendidos sobre a tecnologia, na prospecção tecnológica é realizada a pesquisa pelos documentos através de palavras-chave e na pós-prospectiva é feita a criação do *technology roadmap* (Tabela 6) (BORSCHIVER; SILVA, 2016).

Tabela 6 - Fases do processo de aplicação do technology roadmapping segundo Borschiver; Silva, 2016.

FASE PRÉ-PROSPECTIVA	<ul style="list-style-type: none"> a. Identificar o tema de estudo. b. Levantar o estado da técnica/arte. c. Estabelecer os objetivos. d. Traçar as estratégias para o <i>technology roadmap</i>.
FASE DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA	<ul style="list-style-type: none"> a. Realizar pesquisa para levantamento dos documentos científicos. b. Analisar os resultados gerados pela pesquisa.
FASE PÓS-PROSPECTIVA	<ul style="list-style-type: none"> a. Criar e analisar o <i>technology roadmap</i>. b. Concluir estudo.

Fonte: Adaptado de BORSCHIVER; SILVA, 2016.

A descrição detalhada da metodologia utilizada nesse trabalho e da forma de implementação do TRM será apresentada no capítulo 3 a seguir.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a construção do *technology roadmap* dos nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos, bem como a metodologia de pesquisa empregada, abordando as etapas realizadas em cada fase da elaboração do trabalho.

3.1 Metodologia do trabalho

A pesquisa científica pode ser descrita como sendo um resultado de uma busca minuciosa, realizada por meio de um procedimento metódico que objetiva a resolução de problemas e/ou a descoberta e interpretação de acontecimentos relacionados a um determinado assunto (LEHFELD, 1991).

Com relação a sua classificação, a pesquisa científica pode ser vista quanto à sua natureza, seus objetivos, sua abordagem e seus procedimentos (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Relativo ao primeiro critério, a classificação que essa pesquisa se enquadra é como aplicada, pois tem-se a obtenção de um produto (o *roadmap*) destinado à solução de um problema específico (Tabela 7).

Já relacionada aos objetivos, esse estudo pode ser classificado como descritivo, visto que está envolvido a coleta de documentos e sua análise.

Referindo-se à abordagem, a pesquisa apresenta características qualitativa e quantitativa, dado que é usada uma análise estatística quantitativa para obtenção e classificação dos dados e uma análise qualitativa para tratamento e consideração das informações contidas nos documentos.

Por fim, alusiva aos procedimentos, é possível classificar o estudo como bibliográfico, em razão de serem utilizadas publicações que estão disponíveis, como artigos e patentes, para a elaboração do *roadmap*.

Tabela 7 - Classificação da pesquisa realizada.

Critério	Classificação
----------	---------------

Natureza	Aplicada
Objetivos	Descritiva
Abordagem	Quantitativa-Quantitativa
Procedimentos	Bibliográfica

Fonte: Adaptado de GERHARDT; SILVEIRA, 2009.

3.1.1 Etapas para a construção do trabalho de pesquisa

Com o objetivo de aprimorar o conhecimento a respeito da nanotecnologia e as questões que a envolvem, como seus avanços, benefícios, malefícios, setores industriais impactados e aplicações, bem como para contribuir no direcionamento inicial do estudo, definindo a linha que o tema da dissertação irá seguir, foi realizada uma pesquisa exploratória inicial na base de dados de artigos científicos Scopus. Para isso foram usadas palavras-chave nessas buscas de documentos conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Palavras-chave (em inglês) utilizadas para obter os artigos científicos na base de dados Scopus.

Busca Avançada por Palavras-chave	Total de documentos
TITLE-ABS-KEY(nanomaterial AND environment)	324
TITLE-ABS-KEY(nanomaterial AND effluents AND treatment)	159
TITLE-ABS-KEY(nanomaterial AND treatment AND aqueous AND effluents)	37

Fonte: A autora, 2022.

O levantamento mostrou a relevância que a nanotecnologia apresenta, visto a volumetria considerável de publicações retornadas nesse levantamento inicial, reafirmando a contribuição que ela pode proporcionar nas questões ambientais e validando a escolha pela aplicação dessa tecnologia, especificamente, no setor do meio ambiente voltado para o tratamento de efluentes aquosos, visto que alternativas inovadoras e promissoras estão sendo estudadas e desenvolvidas ao redor do mundo, impulsionadas pela necessidade de garantir um desenvolvimento industrial sustentável e a preservação do meio ambiente.

Uma visualização interessante, das principais palavras-chaves contidas nas publicações retornadas por essas buscas, pode ser feita através do software VOSviewer (versão 1.6.16), que contribuiu significativamente para as análises e escolhas contidas nas próximas etapas desse trabalho.

Pela análise da Figura 13, pode-se notar o destaque de palavras-chave em uma retrospectiva, mostrando quais os principais focos de estudos quando se trata de NM e meio ambiente. Destacam-se as palavras como toxicidade (ecotoxicidade, citotoxicidade, neurotoxicidade, genotoxicidade), danos de DNA, poluição, contaminação, biocompatibilidade, avaliação de risco, liberação ambiental. Também estão presentes as palavras que caracterizam tipos específicos de NMs e suas propriedades como titânio, fulereno, cobre, cério, óxidos minerais, semicondutores, óxido de zinco, dióxido de silício, nanocristais, nanotubos de carbono, grafeno, nanomateriais de carbono, ouro, prata, metais, nanopartículas, materiais nanoestruturados, propriedade de superfície. Já com relação às possíveis aplicações dos NMs, observam-se palavras como tecnologia ambiental, bioremediação, degradação, catálise, fotocatalise, purificação de água, monitoramento ambiental, adsorção, oxidação.

bibliográfica, os *roadmaps* podem possuir diversos formatos e estruturas, e normalmente sofrem adaptações para cada situação específica.

Assim, com o escopo do trabalho definido, a aplicação do TRM consiste na realização das três macro etapas que compõem a estrutura básica para a sua construção, sendo elas denominadas Fase Pré-prospectiva, Fase de Prospecção Tecnológica e Fase Pós-prospectiva, esta última incluindo propriamente a construção do mapa (Figura 16).

Figura 16 - Etapas de construção do *technology roadmap*.



Fonte: Adaptado de BORSCHIVER; SILVA, 2016.

3.1.2.1 Fase pré-prospectiva

Na primeira etapa, denominada “Fase Pré-prospectiva”, é realizada uma pesquisa preliminar, de forma mais geral, sobre o tema e assuntos a ele relacionados, para que seja possível ter um embasamento teórico e maiores informações sobre o tema principal do trabalho.

Essa fase possibilita a formação de uma base de dados inicial que suportará o restante da pesquisa e, por essa razão, é considerada uma etapa primordial.

Dessa forma, através da utilização de base de dados de artigos científicos, a Scopus, para uma busca direcionada com palavras-chave, foi possível um maior entendimento sobre o panorama da nanotecnologia, assim como seus avanços e contribuições para as técnicas de tratamento de águas residuais.

Por meio da execução dessa primeira etapa que se tem o embasamento necessário para a definição das palavras-chave que serão utilizadas nas plataformas de busca, durante a próxima fase de prospecção tecnológica, além de contribuir para definição dos objetivos geral e específico da dissertação.

No presente estudo, o resultado dessa etapa é mostrado na fase de revisão bibliográfica feita no capítulo 1, quando foi realizado o levantamento sobre os nanomateriais e suas aplicações nas técnicas de tratamento de águas residuais.

3.1.2.2 Fase de prospecção tecnológica

A segunda etapa, denominada de “Fase de Prospecção Tecnológica”, compreende a utilização do conhecimento adquirido na fase anterior para realização de buscas mais direcionadas, utilizando um conjunto de palavras-chave, por documentos técnicos como artigos científicos e patentes. Essa execução acontece de forma conjunta com uma seleção criteriosa (qualitativa) em busca dos documentos pertinentes ao tema do estudo. Para garantia de uma seleção eficiente e com elevada qualidade, evidencia-se a imprescindibilidade da fase pré-prospectiva.

Os documentos selecionados, de acordo com a sua categoria, são agrupados em uma evolução temporal compreendida por quatro cortes, sendo eles o estágio atual, curto prazo, médio prazo e longo prazo, definidos da seguinte forma:

- **Estágio Atual:** para esse primeiro corte temporal os documentos utilizados correspondem às informações obtidas na mídia especializada (monitoramento sistemático) ou documentos científicos que sinalizem sobre o estágio atual da tecnologia (fabricantes, detentores das técnicas, etc.).

- **Curto Prazo:** nesse segundo espaço de tempo são aplicadas as informações encontradas nas patentes concedidas, encontradas por meio de base de patentes internacionais e brasileira.
- **Médio Prazo:** para esse terceiro espaço são usadas as informações obtidas nas patentes solicitadas, ou seja, que ainda estão sob análise ou que não foram concedidas, encontradas por bases internacionais e brasileira.
- **Longo Prazo:** nesse quarto e último corte temporal são inseridas as informações encontradas nos artigos científicos, que apresentam em seu conteúdo pesquisas ainda em fase inicial de desenvolvimento.

As bases de dados internacionais, WIPO Patentscope e PatentInspiration, foram as escolhidas para a captação das patentes concedidas e solicitadas. A vantagem de utilização dessas bases é a possibilidade de capturar depósitos feitos mundialmente, proporcionando um levantamento mais completo. Já a base PatentInspiration tem a vantagem adicional de separação da busca por categorias, ou seja, por patentes concedidas e patentes solicitadas, além de recursos de análise e de exportação dos dados que facilitam o trabalho de seleção e análise dos documentos.

Já a base brasileira, mantida pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), dá acesso às patentes depositadas especificamente no Brasil e não possui a separação da busca por patentes concedidas e patentes solicitadas, retornando apenas os documentos depositados (INPI, 2016). A busca realizada nessa base teve como objetivo complementar as informações obtidas pelas bases internacionais.

A busca pelos artigos científicos relacionados ao tema desejado foi feita por meio da base de dados Scopus, propriedade do grupo Elsevier (RELX Group)¹. Esta base foi escolhida por ser a maior base de resumos e citações da literatura científica, que inclui revistas científicas, livros e anais de congressos. São mais de 21.500 revistas e jornais e mais de 360 publicações comerciais de artigos aceitos para publicação (SCOPUS, 2016).

Depois de reunir e selecionar os documentos relevantes ao trabalho são realizadas as análises dos dados de forma Macro, Meso e Micro:

¹ RELX Group (ou Reed Elsevier) é uma companhia multinacional com base em Londres, detentora da editora Elsevier e da base de dados Scopus, além de diversos outros negócios baseados em informações, dados de análise, publicações acadêmicas ou de negócios.

- **Análise 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).
- **Análise 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.
- **Análise Micro:** é feito um detalhamento das taxonomias, ou seja, são estabelecidas subcategorias das taxonomias mais gerais adotadas na análise Meso e nesse último nível serão realizadas as análises relativas ao trinômio mercado, produto e tecnologia adotados em cada um dos documentos selecionados.

3.1.2.3 Fase pós-prospectiva

A terceira e última etapa, denominada de “Fase Pós-prospectiva”, é o momento que engloba a organização em tendências e separação de acordo com uma evolução temporal de todo o conhecimento que foi convertido em inteligência, ou seja, momento de elaboração e construção do *technology roadmap*.

O mapa tecnológico tem na sua estrutura uma divisão em dois eixos: horizontal e vertical (Figura 17). No eixo vertical, no início do mapa, é alocada uma coluna com várias divisões contendo as taxonomias, selecionadas com base nas tendências tecnológicas indentificadas ao longo do estudo. No eixo horizontal, é estabelecida a divisão temporal descrita na segunda etapa do método: Estágio Atual, Curto Prazo, Médio Prazo e Longo Prazo.

Figura 17 - Exemplo da disposição das informações no technology roadmap. (1) Título, (2) Divisão temporal, (3) Raias de alocação dos atores encontrados, (4) Separadores e (5) Taxonomias.

		Título 1		
		Fase 2	Fase 2	Fase 2
Função	Taxonomia 1	3	3	3
	Taxonomia 2			
Função	Taxonomia 3	3	3	3
	Taxonomia 4			
Função	Taxonomia 5	3	3	3
	Taxonomia 6			

Fonte: A autora, 2022.

No espaço de encontro entre os eixos, vertical e horizontal, são posicionados os atores (*players*) encontrados durante o estudo. Eles representam as universidades, institutos de pesquisa e empresas que publicaram os artigos científicos ou que patentearam produtos/processos e, por terem relevância e estarem dentro do escopo do tema e objetivo desse trabalho, foram selecionados na fase de prospecção tecnológica.

A introdução desses atores no mapa ocorre através de suas logomarcas (marca registrada) e o posicionamento é feito de acordo com as taxonomias e com a divisão temporal a que pertencem. Salienta-se que o mesmo ator pode aparecer em diferentes divisões temporais ao mesmo tempo, relacionado com diferentes taxonomias.

Para visualizar qual ator se relaciona com qual taxonomia, são usadas setas na vertical que saem do ator e vão até o ponto de interseção com a faixa da taxonomia ao qual este se refere (Figura 18). No exemplo representado, o ator “UERJ” estaria relacionado às taxonomias 1 e 6, dentro da divisão temporal de curto prazo.

Figura 18 - Exemplo da disposição dos atores encontrados no estudo e do uso das setas indicativas.

		Título			
		Estágio Atual	Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
Função	Taxonomia 1				
	Taxonomia 2				
Função	Taxonomia 3				
	Taxonomia 4				
Função	Taxonomia 5				
	Taxonomia 6				

Fonte: A autora, 2022.

Por meio do software Microsoft® Excel® 2016, do pacote Microsoft® Office, é possível inserir a logomarca dos atores (*players*) encontrados durante a fase de prospecção tecnológica, associá-los a uma ou mais tendências e posicioná-los no espaço de tempo que é conveniente, de acordo com a origem da informação (artigo científico, patente concedida e patente solicitada).

3.1.3 Artigos científicos e documentos patentários como fonte de informação científica e tecnológica

A informação científica é o conhecimento decorrente de uma pesquisa científica e que constituiu, em um momento específico da evolução da ciência, uma contribuição adicional ao entendimento universal acerca de um assunto de interesse. Já com relação à informação tecnológica, de acordo com a Federação Internacional de Documentação (FID), diz respeito a "todo conhecimento de natureza técnica, econômica, mercadológica, gerencial, social entre outros, que por sua aplicação, favoreça o progresso na forma de aperfeiçoamento e inovação" (BORSCHIVER; SILVA, 2016). Assim, a procura por informação científica e tecnológica possibilita o entendimento a respeito das tecnologias disponíveis, direciona pesquisas e trabalhos acadêmicos, além de nortear novos investimentos para o setor industrial.

Os artigos científicos são documentos que representam uma relevante fonte de informação tecnológica proveniente do meio científico. As informações neles contidos

propocionam a passagem do conhecimento obtido pelos pesquisadores, tendo como utilidade ser uma literatura de apoio para confirmar os estudos já realizados ou guiar o desenvolvimento de novas pesquisas (BORSCHIVER; SILVA, 2016). Já o documento patentário, que também é uma importante fonte de informação tecnológica, é um documento comprobatório de que um inventor detém direitos sobre determinado invento e que abrange, obrigatoriamente, uma descrição detalhada da invenção. Por esse motivo, as patentes tornam-se uma das mais valiosas fontes das últimas tecnologias de ponta que existem (MARTINEZ, BRAGA JR; ANTUNES, 2013).

Através da análise desses documentos é possível averiguar o desenvolvimento de tecnologias de interesse, de modo que são excelentes indicadores de inovação. Os documentos patentários, patentes concedidas e pedidos de patentes, podem funcionar como mensuração de resultados de P&D, produtividade, estrutura e a situação de desenvolvimento de certa indústria ou tecnologia (BORSCHIVER; SILVA, 2016). Além do mais, o quantitativo de patentes concedidas de uma determinada empresa ou até mesmo de um país pode demonstrar o dinamismo tecnológico existente e uma verificação a respeito do crescimento de concessões de patentes sobre um dado tema pode apontar a direção de uma mudança tecnológica (SANTOS, 2011).

A patente é um documento de propriedade destinado a proteger as criações produzidas e outorgado pelo Estado, que estabelece o direito exclusivo de exploração de determinada invenção ou modelo de utilidade por parte de seu titular por determinado período de tempo e em um território específico. Conforme a Lei da Propriedade Industrial brasileira, a Lei N° 9279 de 14 de maio de 1996, é patenteável uma invenção ou um modelo de utilidade que atendam a determinados requisitos. Os requisitos básicos de patenteabilidade para patentes de invenção são novidade, atividade inventiva e aplicação industrial. Já como modelo de utilidade, é patenteável o objeto de uso prático, ou parte deste, passível de aplicação industrial, que contenha nova forma ou disposição, envolvendo ato inventivo, que resulte em melhoria funcional no seu uso ou em sua fabricação. Com relação ao prazo determinado desse direito exclusivo, de acordo com a Lei 9279/96, este pode variar de 15 a 20 anos dependendo da origem do documento.

3.1.4 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica contempla a obtenção de artigos científicos e documentos patentários, ou seja, patentes concedidas e solicitadas, referentes aos NMs aplicados ao tratamento de águas residuais industriais, que compõem a fonte de informação tecnológica do trabalho.

O levantamento desses documentos foi feito por meio das bases dados Scopus, PatentInspiration, WIPO PatentScope e INPI, levando em considerações as publicações realizadas nos últimos 11 anos (2011 a 2021). A consideração da base INPI, vinculado ao Ministério da Economia do Brasil, teve como objetivo garantir o levantamento de informações patentárias no âmbito nacional.

3.1.4.1 Estratégias de busca, análise e seleção dos dados

Artigos Científicos

Como já mencionado, a busca por artigos científicos ligados ao tema de estudo, que se relacionam ao espaço temporal de longo prazo no *roadmap*, foi realizada através da base de dados Scopus.

Assim, a pesquisa foi realizada da seguinte forma:

- **Data da pesquisa:** Setembro de 2021;
- **Banco de Dados:** Scopus;
- **Parte do documento onde foi feita a busca:** Título, Resumo e Palavras-Chave.

A primeira parte da estratégia de busca, para o levantamento dos artigos científicos, foi feita através de uma pesquisa direcionada por um conjunto de palavras-chave, conforme mostrado na Tabela 9. Esse conjunto das palavras-chave teve o intuito de abranger as possíveis similaridades de expressões usadas na área da nanotecnologia e do tratamento de águas residuais, garantindo assim um levantamento abrangente e reduzido risco de perda de informações relevantes para o tema em estudo.

Tabela 9 - Palavras-chave (em inglês) utilizadas para levantamento dos artigos científicos na base de dados Scopus.

Busca avançada por Palavras-chave

TITLE-ABS-KEY((nanomaterial* OR nanoparticle* OR nanocomposite* OR nanostructured) AND wastewater AND treatment)

TITLE-ABS-KEY((nanomaterial* OR nanoparticle* OR nanocomposite* OR nanostructured) AND waste water AND treatment)

Fonte: A autora, 2022.

Com o objetivo de delimitar esse levantamento inicial, uma segunda parte da estratégia de busca foi aplicada (Tabela 10), a fim de refinar esses resultados, em que os conjuntos dos artigos científicos retornados durante as pesquisas com as palavras-chave tiveram a aplicação de filtros nos tópicos “Open Access”, “Year”, “Subject area” e “Document type”, para os dois conjuntos pesquisados, além do “Keywords” para o conjunto específico da “TITLE-ABS-KEY((nanomaterial* OR nanoparticle* OR nanocomposite* OR nanostructured) AND wastewater AND treatment)”, dado o quantitativo muito expressivo de publicações retornadas para ele e optou-se por garantir a relevância de informação acerca das técnicas de tratamento de águas residuais, por se tratar do principal ponto de informação tecnológica que se deseja avaliar no presente estudo.

Tabela 10 - Estratégia de busca para refinamento dos artigos científicos na Scopus.

Palavras-chave	Tópicos	Filtros Aplicados	Total de documentos
TITLE-ABS-KEY((nanomaterial* OR nanoparticle* OR nanocomposite* OR nanostructured) AND wastewater AND treatment)	Open Access	All Open Access	1797
	Year	2011 a 2021	
	Subject area	Environmental Science Chemistry Materials Science Chemical Engineering	
	Document type	Article Review Conference Paper	
	Keywords*	Wastewater Treatment Waste Water / Wastewater Treatment Plant Wastewater Treatment Process Waste Water / Wastewater Waste Water Management Waste Treatment Industrial Wastewaters Waste Component Removal	
TITLE-ABS- KEY((nanomaterial* OR nanoparticle* OR nanocomposite* OR nanostructured) AND waste water AND treatment)	Open Access	All Open Access	750
	Year	2011 a 2021	
	Subject area	Environmental Science Chemistry Materials Science Chemical Engineering	
	Document type	Article Review Conference Paper	

Fonte: A autora, 2022.

Os documentos resultantes dessa triagem inicial na plataforma da Scopus foram exportados do site no formato de arquivo Excel contendo as seguintes informações: Informação de citação (Autor(es); ID do(s) autor(es); Título do documento; Ano; EID; Título da Fonte; Volume, problema, páginas; Contagem de citações; Fonte e tipo de documento; Estágio de Publicação; DOI; Acesso livre), Informação bibliográfica (Editor), Resumo e palavras-chave

(Resumo; Palavras-chave do autor; Palavras-chave de índice) e Referências; e unificados em um único arquivo posteriormente.

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado o Excel que proporcionou a organização das informações dos artigos científicos em planilhas, facilitando a leitura, o estabelecimento de classificações e análises quantitativas do levantamento feito, garantindo assim o entendimento e apropriada gestão do conhecimento sobre o tema, além da realização do estudo de prospecção tecnológica e da construção do mapa tecnológico, o *roadmap*.

Diante do arquivo Excel unificado, que contém a listagem total dos documentos obtidos através das buscas na base Scopus, a primeira ação executada é a remoção de duplicatas, a fim de evitar a repetitividade de um mesmo documento presente na listagem final que será analisada, de maneira que o total final de artigos científicos publicados levantados foi de 1390.

A partir das informações contidas nos resumos desses artigos científicos, foram feitas buscas a partir de palavras-chave referentes a classes de contaminantes removidos e ao tratamento de águas residuais empregadas, com o intuito de entender quais são os temas mais expressivos, possibilitando fazer uma escolha mais refinada para o tema de estudo dessa dissertação.

As palavras-chave utilizadas nessa análise foram obtidas pelo próprio conjunto de palavras-chaves definidas pelos autores e indexadas. Com auxílio do Excel e do VOSviewer foi possível identificar as palavras-chaves mais relevantes e localizá-las nos documentos, permitindo o enquadramento dos artigos nas categoriais estabelecidas (contaminantes e técnicas de tratamento) e a análise desses quantitativos, contribuindo para o direcionamento do estudo e fechamento do escopo, visto que a quantidade de documentos levantados para o tema foi expressiva e muito abrangente.

Para o conjunto de palavras-chave destinadas a busca dos tipos de contaminates, foi estabelecido quatro grandes grupos que caracterizam as macro classes desses contaminantes, permitindo uma primeira etapa de análise. Essas classes são os Metais, Compostos Orgânicos, Compostos Inorgânicos e Contaminates Emergentes. A lista das palavras-chave utilizadas é disponibilizada na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 - Lista das palavras-chave utilizadas na identificação das macro classes de contaminantes contidas nos artigos científicos.

Palavras-chave			
Macro Classes de Contaminantes			
Metais	Compostos Orgânicos	Compostos Inorgânicos	Contaminantes Emergentes
lead	orange	chloride	pharmaceutical
Pb	methyl orange	sulfur	antibiotic
cadmium	methylene blue	sulfide	carbamazepine
Cd	rhodamine	sulfone	drug
molybdate	methyl violet	fluorine	nitrofurazone
chromium	congo red	fluoride	gemfibrozil
Cr	acid red 18	phosphorus	diclofenac
uranium	tartrazine	nitrogen	cyclodextrin
cesium	dye	nitrite	triclosan
arsenic	dichlorophenol	nitrate	hormone
selenium	aromatic	phosphate	estrogen
rhodium	nitrophenol	radionuclides	endocrine disruptor
bismuth	toluene	cyanides	emerging
mercury	benzene	nitro-compound	nanoplastic
cobalt	phenolic	inorganic contaminant	microplastic
nickel	phenol	inorganic pollutant	humic acid
manganese	oil		fertilizer
calcium	TCE		atrazine
palladium	PCE		pesticide
heavy metal	DCE		herbicide
	BTEX		bisphenol
	methane		
	organic contaminant		
	organic pollutant		

Fonte: A autora, 2022.

Já para o conjunto de palavras-chave destinadas à busca pelas técnicas de tratamento, foi feita a separação pelas categorias Adsorção; Degradação/Decomposição; Membrana/Filtração; Coagulação; Sedimentação; Flotação; e Floculação, conforme pode ser verificado na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 - Lista das palavras-chave utilizadas na identificação das técnicas de tratamento contidas nos artigos científicos.

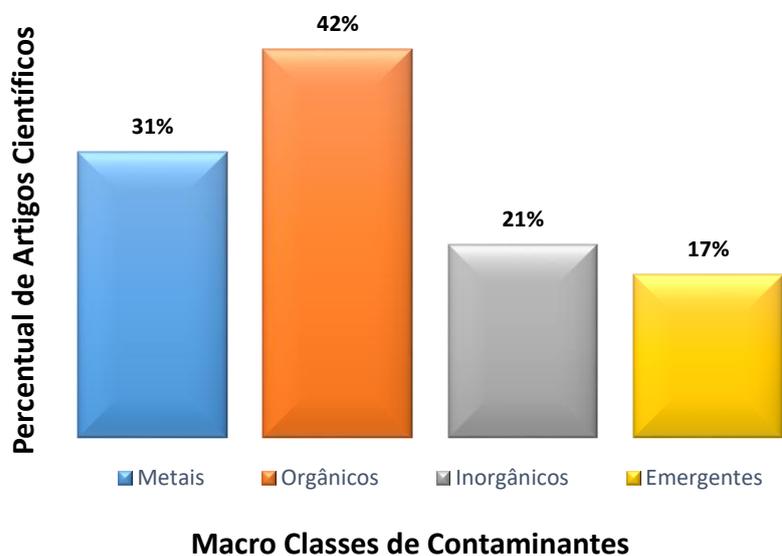
Palavras-chave						
Técnicas de Tratamento						
Adsorção	Degradação/ Decomposição	Membrana/ Filtração	Coagulação	Sedimentação	Flotação	Floculação
adsorbent	mineraliz*	membrana	coagula*	sedimentation	flotation	flocculation
sorbent	electrolysis	osmosis				
adsorpti*	cataly*	filtration				
*sorption	photocatalysis					
	degradation					
	reduction					
	oxidation					
	fenton					
	photolysis					
	pyrolysis					
	reaction					
	decolorized					
	electrochemical					
	decomposition					

Legenda: “*” representa que apenas parte da palavra foi inserida para compor a busca nos documentos.

Fonte: A autora, 2022.

A partir da localização dos itens contidos no conjunto de palavras-chave destinadas a busca das macro classes de contaminates, pôde ser observado que a classe de contaminates de maior predominância nos estudos foi a dos Compostos Orgânicos, com 42% do total dos artigos científicos, como pode ser verificado na Figura 19.

Figura 19 - Principais classes de contaminantes removidos pelas técnicas de tratamento presentes nos artigos científicos.



Fonte: A autora, 2022.

Esse percentual de 42% de artigos científicos representa um quantitativo numérico de 577 documentos, uma quantidade ainda elevada de registros e bastante abrangente para realização do estudo prospectivo proposto. Por isso, optou-se por fazer uma análise com uma maior abertura para essa classe de contaminantes, os Compostos Orgânicos, que teve o conjunto de palavras-chave separada em quatro categoriais, Corantes, Aromáticos, Óleo e Outros, conforme detalhado na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 - Lista das palavras-chave utilizadas nas categorias estabelecidas para análise dos compostos orgânicos contidos nos artigos científicos.

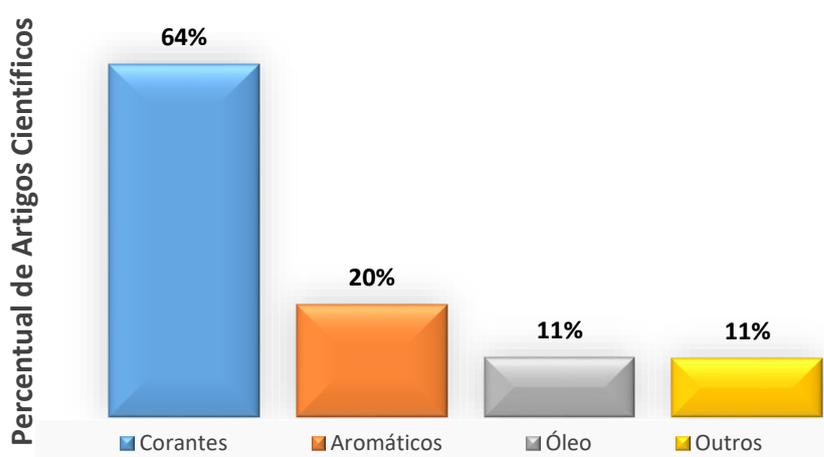
Palavras-chave			
Compostos Orgânicos			
Corantes	Aromáticos	Óleos	Outros
orange	dichlorophenol	oil	TCE
methyl orange	aromatic		PCE
methylene blue	nitrophenol		DCE
rhodamine	toluene		BTEX
methyl violet	benzene		methane
congo red	phenolic		organic pollutant*
acid red 18	phenol		organic contaminant*
tartrazine			
dye			

Legenda: "*" considerados no quantitativo dessa categoria se não houve ocorrência em "Corantes", "Aromáticos" e "Óleos".

Fonte: A autora, 2022.

Assim, foi possível observar que, dentre as quatro categorias estabelecidas para os compostos orgânicos, os corantes orgânicos são os mais representativos, com 64% do total de artigos científicos que citam compostos orgânicos, conforme pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 - Principais compostos orgânicos presentes nos artigos científicos.

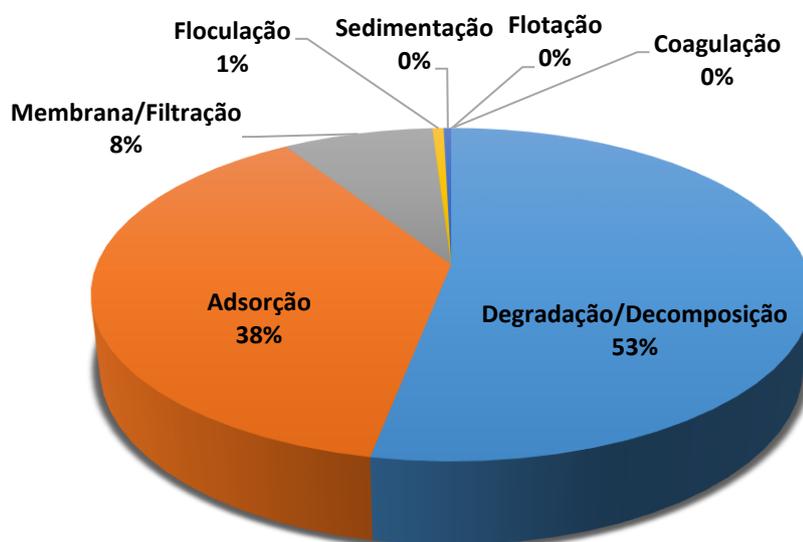


Fonte: A autora, 2022.

Visto que esse percentual de 64% caracteriza um quantitativo numérico de 371 documentos, um volume ainda bastante expressivo de registros para serem considerados no

estudo prospectivo, optou-se pela escolha de um novo parâmetro para refinar esse conjunto de dados. O parâmetro escolhido foi a técnica de tratamento utilizada para a remoção do corante orgânico como contaminante. Assim, a partir das palavras-chaves que refletem as principais técnicas, já apresentadas anteriormente na Tabela 12, é possível observar suas distribuições de ocorrências (Figura 21).

Figura 21 - Porcentagem das técnicas de tratamento para os corantes orgânicos sintéticos presentes nos artigos científico.

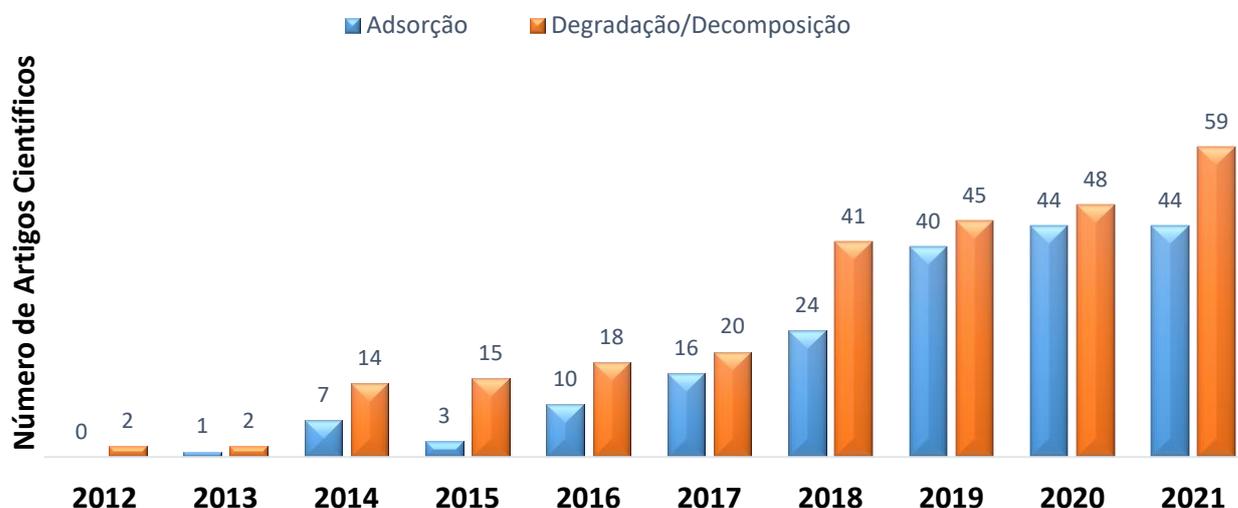


Fonte: A autora, 2022.

Observa-se que as técnicas mais representativas são os processos de Degradação/Decomposição e a Adsorção, mencionadas, respectivamente, em 53% e 38% dos artigos científicos que abrangem os corantes orgânicos.

Dessa forma, a fim de ter uma última avaliação desses dois conjuntos de técnicas e fechar o escopo do estudo prospectivo do trabalho, foi elaborado um gráfico para analisar a tendência de estudos publicados para essas técnicas ao longo dos anos (Figura 22).

Figura 22 - Análise temporal das técnicas de tratamento de águas residuais destinadas a remoção de corantes orgânicos sintéticos como contaminante.



Fonte: A autora, 2022.

É possível observar que ambas as técnicas seguem uma tendência de alta nas publicações de pesquisas científicas, sendo o conjunto compreendido pelos métodos de degradação/decomposição um pouco mais expressivo no total de artigos publicados do que o método de adsorção ao longo dos últimos 10 anos.

Em vista disso, é possível um melhor entendimento dos assuntos que possuem maiores destaques e o fechamento do escopo do tema da dissertação, em que se decide pela limitação do conjunto de artigos científicos relacionados aos nanomateriais aplicados ao tratamento terciário, do tipo degradação/decomposição, de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos para fazer o estudo de prospecção tecnológica e elaboração do *roadmap*.

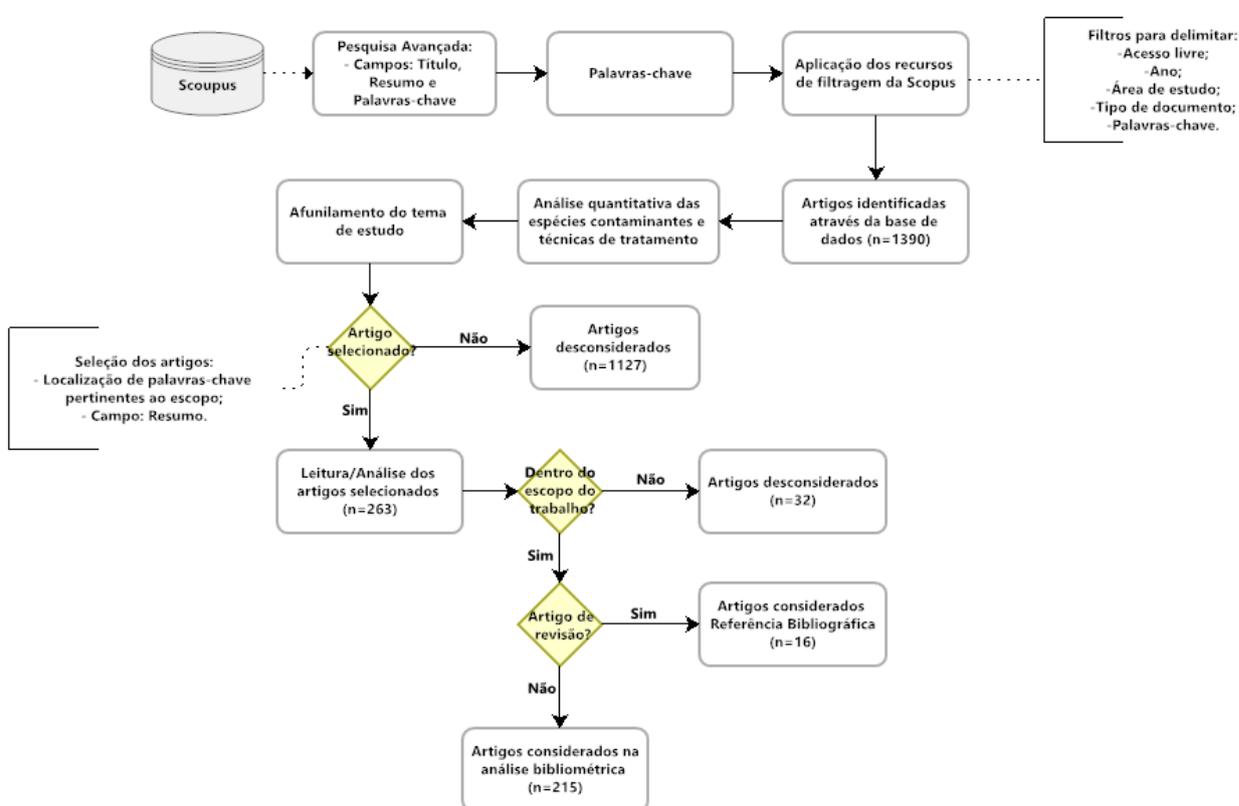
Essa escolha que leva em consideração não só o maior quantitativo de estudos para essas técnicas de tratamento aplicadas aos corantes orgânicos sintéticos, mas também o fato de serem processos mais limpos, visto que possuem um menor volume de resíduos gerados ao final do tratamento ou de ciclos de operação quando comparado aos processos adsorptivos.

Assim, com a realização dessa primeira triagem e o estabelecimento do conjunto de documentos relacionados aos NMs aplicados ao tratamento terciário, do tipo degradação/decomposição, de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos (n=263), uma análise de forma mais profunda foi feita nesses registros, a partir da

leitura completa de seus resumos, o que possibilitou a identificação e um segundo nível de seleção dos artigos (n=215) que de fato eram relevantes para o estudo e considerados na análise bibliométrica.

O diagrama de fluxo a seguir (Figura 23) mostra as etapas envolvidas na pesquisa, análise e seleção dos artigos científicos.

Figura 23 - Diagrama de fluxo da pesquisa e seleção dos artigos científicos da base Scopus.



Fonte: A autora, 2022.

Patentes

Conforme já relatado, a busca por patentes ligadas ao tema de estudo, que se relacionam ao espaço temporal de curto (patentes concedidas) e médio (patentes solicitadas) prazo no *roadmap*, foi realizada através de pesquisas direcionadas por conjuntos de palavras-chave em três base de dados. A estratégia utilizada nas buscas e o total de patentes resultantes são mostradas a seguir na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados e palavras-chave utilizadas para levantamento das patentes concedidas e solicitadas.

Data da pesquisa	Banco de Dados	Campo de busca	de	Palavras-chave	Total de documentos
Outubro/2021	WIPO Patentscope	Todos os campos	os	EN_ALLTXT:(nanomaterial* OR nanoparticle* OR nanostructured OR nanocomposite* AND dye* AND wastewater treatment OR waste water treatment)	414
Outubro/2021	PatentInspiration	Título e Resumo	e	nanomaterial* OR nanoparticle* OR nanostructured OR nanocomposite* AND dye* AND wastewater treatment OR waste water treatment	33
Outubro/2021	INPI	Resumo		nano* E água OU resíduo* OU efluente* E tratamento	206

Fonte: A autora, 2022.

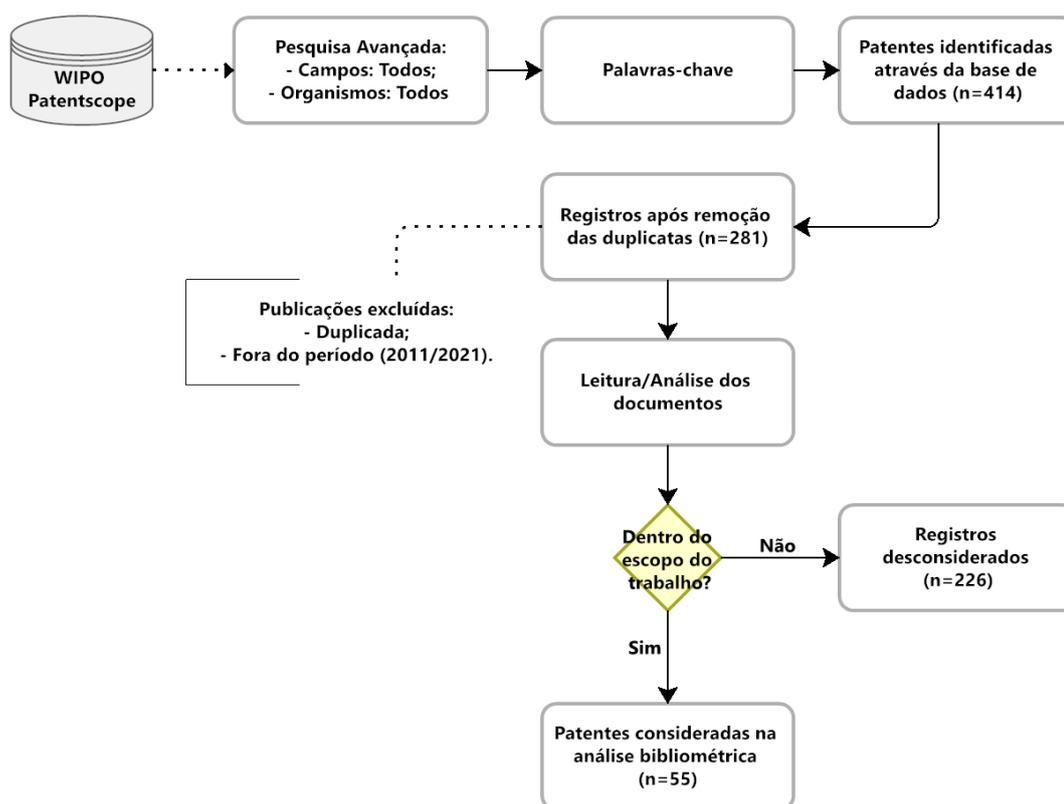
A título de esclarecimento, optou-se que o conjunto de palavras-chave utilizadas para a busca na base INPI fosse diferente das outras duas bases, pois, com o uso dos mesmos termos, a pesquisa direcionada não retornou nenhum resultado. Assim, preferiu-se ter uma pesquisa mais ampla nessa base para garantir que não houvesse perda informações e documentos relevantes para o tema em estudo.

Mediante todos os resultados das buscas levantados das bases WIPO Patentscope, PatentInspiration e INPI, foi realizada a seleção das patentes concedidas e solicitadas de interesse, ou seja, que de fato são relevantes para o estudo, com base na análise de seus resumos.

Do total dos 414 registros de patentes obtidas da base WIPO Patentscope, 133 registros estavam repetidos ou fora do período analisado, de maneira que o número real de patentes analisadas foi de 281. Desse conjunto, foram identificadas 55 documentos que estão dentro do escopo do trabalho, sendo 21 patentes concedidas e 34 patentes solicitadas consideradas na análise bibliométrica. Notou-se que muitos documentos não foram pertinentes ao assunto devido não relatarem as técnicas de tratamento definidas como parte do escopo do trabalho,

reações de oxidação e redução. O diagrama de fluxo a seguir (Figura 24) mostra as etapas envolvidas na pesquisa e seleção desse conjunto de patentes.

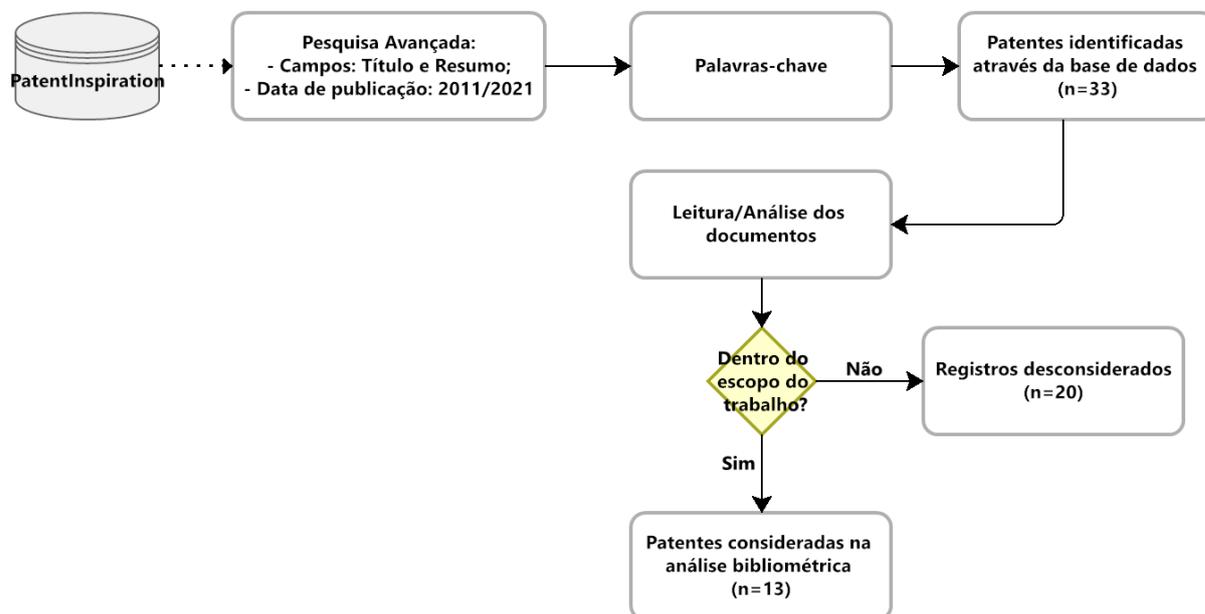
Figura 24 - Diagrama de fluxo da pesquisa e seleção das patentes da base WIPO Patentscope.



Fonte: A autora, 2022.

Já para a base PatentInspiration, do total de 33 registros de patentes obtidos, foram identificados 13 documentos dentro do escopo do trabalho, sendo 4 patentes concedidas e 9 patentes solicitadas consideradas na análise bibliométrica. Também foi notado que o conjunto de documentos desconsiderados não foram pertinentes ao assunto devido não relatarem as técnicas de tratamento definidas como parte do escopo do trabalho, reações de oxidação e redução. O diagrama de fluxo a seguir (Figura 25) mostra as etapas envolvidas na pesquisa e seleção desse conjunto de patentes.

Figura 25 - Diagrama de fluxo da pesquisa e seleção das patentes da base PatentInspiration.

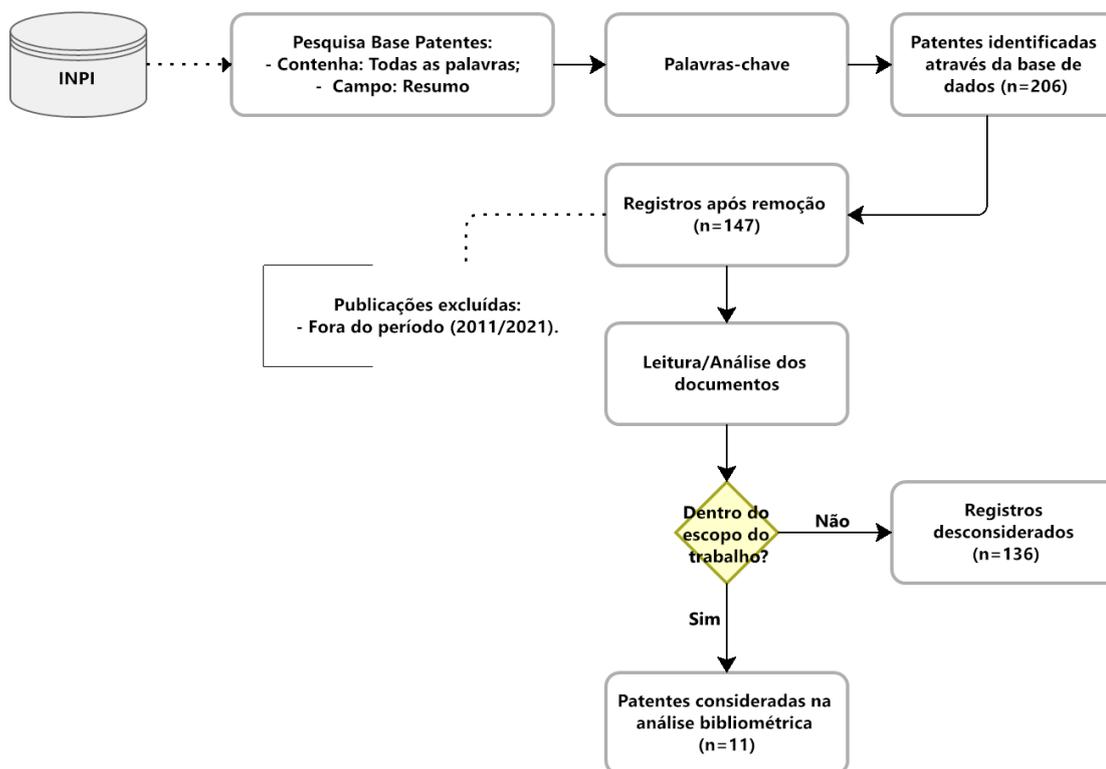


Fonte: A autora, 2022.

Já para a base do INPI, do total de 206 registros de patentes obtidos, 59 estavam fora do período analisado, de maneira que o número real de patentes analisadas foi de 147. Desse conjunto, foram identificados 11 documentos que estão dentro do escopo do trabalho, sendo 2 patentes concedidas e 9 patentes solicitadas consideradas na análise bibliométrica.

Nota-se que o conjunto de documentos desconsiderados não foram pertinentes ao assunto devido à abrangência de outras áreas de aplicação dos NMs, como farmacêutica e médica, ou a aplicação do NM com outras finalidades, como por exemplo, o revestimento de superfícies ou como aditivo para melhoramento de diferentes materiais. Ou seja, não são relevantes por não relatarem a aplicação no tratamento águas residuais contaminadas por corantes orgânicos e pelos tipos de técnicas que fazem parte do escopo do trabalho. O diagrama de fluxo a seguir (Figura 26) mostra as etapas envolvidas na pesquisa e seleção desse conjunto de patentes.

Figura 26 - Diagrama de fluxo da pesquisa e seleção das patentes da base INPI.



Fonte: A autora, 2022.

Dessa forma, com os documentos finais selecionados (215 artigos científicos, 27 patentes concedidas e 52 solicitadas) foi feito um estudo de tendência e elaboração de um *roadmap*, que é o objetivo principal desse trabalho.

3.1.5 Definição das taxonomias

Com a análise preliminar dos artigos e patentes, inclusive dos documentos contidos na revisão bibliográfica, um melhor entendimento e embasamento sobre o tema foram possíveis, acerca de suas principais informações sobre características, tecnologias e matérias-primas já aplicadas.

Assim, com base nesse conhecimento adquirido, as taxonomias foram criadas a partir da disposição das informações extraídas dos documentos analisados. As taxonomias podem ser divididas em três níveis diferentes, de acordo com a sua profundidade no tema.

A análise baseada nas taxonomias é primordial para a elaboração do *roadmap*, possibilitando ainda a visualização de possíveis tendências. Os níveis são Macro, Meso e Micro e estão detalhados a seguir.

a) Nível Macro: Análise mais geral dos documentos, sem abranger detalhes específicos do tema, levando em consideração a distribuição histórica, países envolvidos, universidades/centros de pesquisa e empresas atuantes no setor. Outra possibilidade, que também pode ser verificada nessa análise, são as parcerias entre empresas ou entre empresa-universidade.

b) Nível Meso:

- Característica do Produto Final;
- Produto Final;
- Matéria-prima do NM.

c) Nível Micro:

- Característica do Produto Final:
 - Obtenção Econômica: Baixo custo das matérias-primas e/ou das técnicas de obtenção (simples, rápidas e que levam a economia de recursos e menores custos operacionais);
 - Recuperabilidade: Aplicação de procedimentos que garantem a recuperação do NM no meio reacional ou a disposição do NM sob formas ou estruturas que facilitam essa remoção;
 - Seletividade: Tratabilidade específica de contaminantes alvos, proporcionando melhor aproveitamento dos catalisadores, desempenho da técnica e menores custos operacionais;
 - Eficiência de tratamento: Elevados percentuais de remoção do contaminante (>50%);
 - Rápido tratamento: Baixos tempos de tratamento do efluente aquoso (ordem de grandeza = horas; < 24hrs);

- Estabilidade: Química, física, térmica e/ou estrutural, garantindo a manutenção das características e propriedades do nanomaterial;
 - Vantagens ambientais: Nanomateriais com baixa toxicidade, biodegradável e/ou reduzidos impactos/contaminação secundária durante o uso.
- Produto Final:
- Catalisador;
 - Agente Microbiológico;
 - Eletrodo;
 - Adsorvente;
 - Membrana/filtro.
- Matéria-prima do NM:
- Biológica: Vegetais, animal, algas ou microbiológica;
 - Mineral: Fonte dos componentes metálicos, seja pela ocorrência como minerais, sais, óxidos, hidróxidos ou ácidos;
 - Sintética: Polímeros artificiais ou outras substâncias sintéticas diretamente ligadas a estrutura e composição final dos nanomateriais, assim como para sua funcionalização;
 - Resíduo: Materiais residuais provenientes de diferentes setores industriais ou urbanos, que podem ser de origem biológica, mineral ou sintética.

Após o entendimento da metodologia aqui explicada, o próximo capítulo abordará a fase de prospecção tecnológica. Serão apresentadas as análises e discussões das informações contidas nos documentos relevantes, a saber, 215 artigos científicos, 27 patentes concedidas e 52 patentes solicitadas, em função das taxonomias descritas acima.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fase de prospecção tecnológica

Seguindo a metodologia relatada para a realização do presente estudo, foi evidenciada como a segunda etapa a “Fase de Prospecção Tecnológica”. Dessa forma, após a etapa inicial de junção dos dados gerais e estabelecimento de uma base sólida de conhecimento sobre o tema escolhido, foi executada a fase de busca mais direcionada, com uso de palavras-chave definidas para a seleção dos documentos relevantes.

Neste capítulo, são relatados os resultados da prospecção adotada, explicando detalhadamente os resultados obtidos para cada tipo de documento (artigo científico, patente solicitada e patente concedida), segmentado em análises Macro, Meso e Micro, além da realização de uma conclusão geral dos resultados obtidos para finalizar.

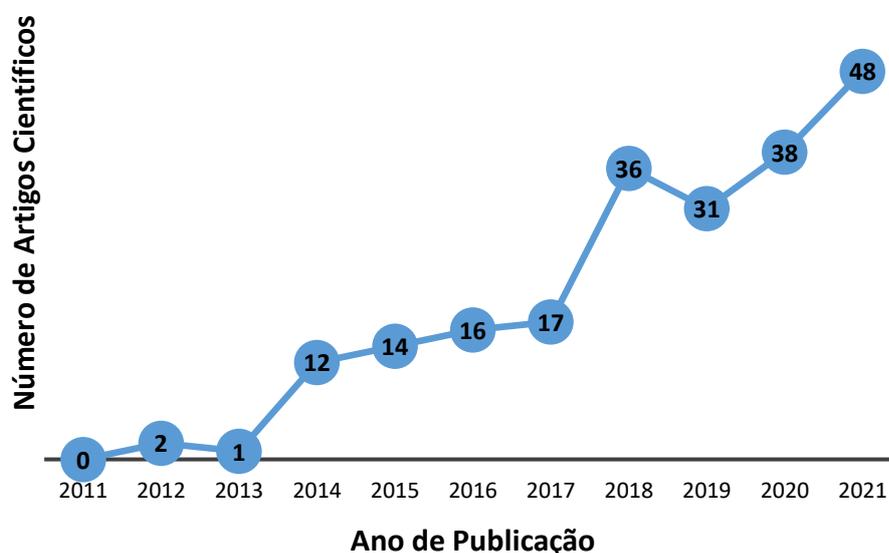
4.1.1 Prospecção tecnológica – artigos científicos

Para as análises realizadas nessa fase, foi utilizado o conjunto dos documentos considerados relevantes, ou seja, 215 artigos científicos (Apêndice A).

4.1.1.1 Análise macro

A série histórica abrangeu o período de onze anos, com as datas de publicação dos artigos relevantes variando de 2011 a 2021. Analisando a evolução temporal das publicações, interessante observar que, dentro do conjunto de documentos selecionados, o número dos artigos científicos sobre o tema segue uma crescente ao longo dos anos, confirmando o interesse da comunidade científica na exploração e desenvolvimento desse assunto (Figura 27). O maior volume de artigos por ano atualmente se encontra no ano de 2021, com um total de 48 artigos científicos publicados.

Figura 27 - Evolução temporal do número de publicações de artigos científicos.

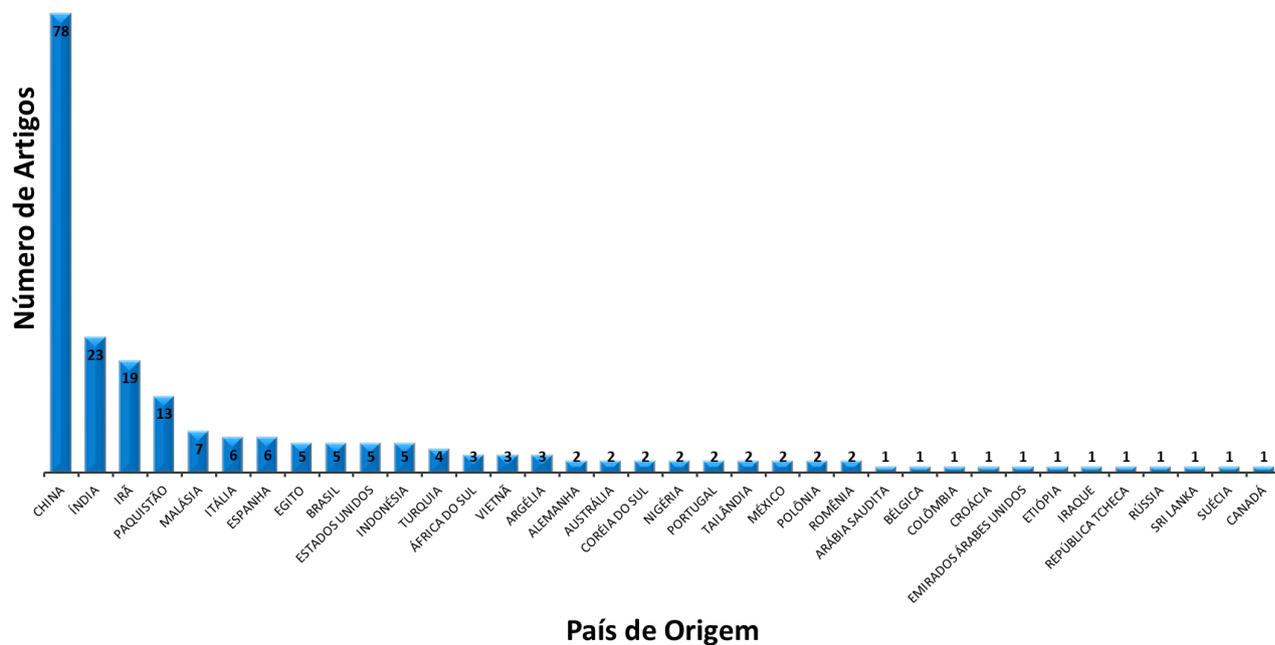


Fonte: A autora, 2022.

Essa tendência de evolução pode ser justificada pelo fato, como relatado na introdução deste estudo, de haver uma mobilização mundial para o desenvolvimento de tecnologias que promovam a adequação das águas residuais industriais contaminados, garantindo não só a minimização de impactos ambientais e a preservação dos recursos hídricos ainda disponíveis, mas também a possibilidade de reutilização dessa água no processo industrial, reduzindo a captação externa desse recurso.

Em relação à distribuição de artigos por país de origem, tem-se um conjunto de 36 países e a China se destaca como grande produtor de conteúdo sobre o tema, seguida pela Índia (Figura 28). A posição de liderança ocupada pela China e Índia nesse quantitativo de publicações científicas pode estar relacionada ao fato de que, tratando do setor têxtil no mundo, elas assumem o mesmo posicionamento no *ranking* de produção mundial de têxteis, com a China (1º lugar) concentrando quase 60% dessa produção e a Índia (2º lugar) 9%. Esse setor é considerado um dos que mais consome o recurso hídrico durante o processo e ao mesmo tempo o polui através do descarte de resíduos líquidos não tratados adequadamente e eficientemente, levando uma carga extensiva de contaminantes para o meio ambiente, dentre os quais se destacam os corantes orgânicos sintéticos. O Brasil, com 5 artigos publicados, iguala-se à países como Egito, Estados Unidos e Indonésia nesse mesmo quantitativo de publicações.

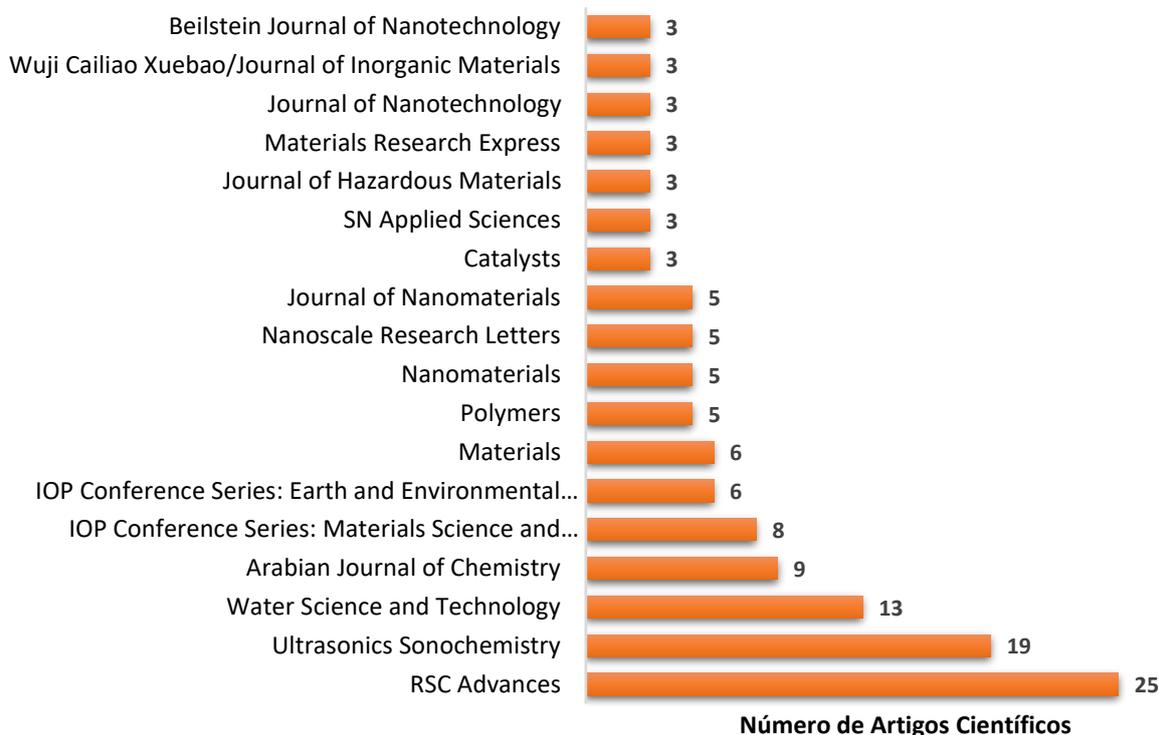
Figura 28 - Artigos científicos separados pelos trita e seis países de origem que tiveram publicações.



Fonte: A autora, 2022.

Já na distribuição dos artigos pelos periódicos científicos, tem-se que 10 das 18 revistas em que mais se publicaram sobre o tema são revistas especializadas em nanotecnologia e materiais, e também que 2 das 18 revistas são especializadas em meio ambiente e água (Figura 29). Levando em considerção a análise do total das 93 revistas encontradas, nota-se que aproximadamente 32% destas tem como tema central a nanotecnologia e materiais, e 19% como tema central meio ambiente e água.

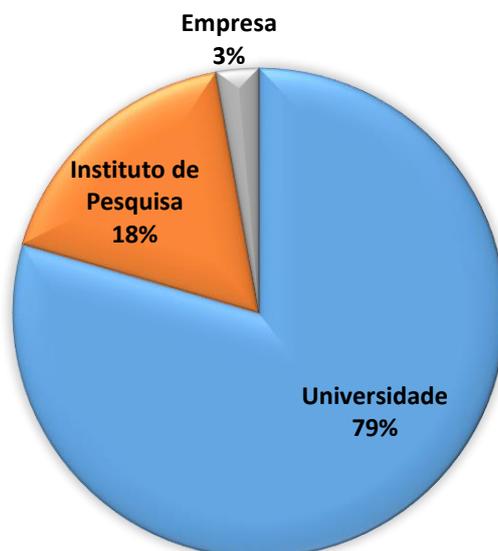
Figura 29 - Seleção dos periódicos onde se publicaram pelo menos 3 artigos científicos.



Fonte: A autora, 2022.

Foi encontrado um total de 215 instituições responsáveis pelas publicações durante a pesquisa, sendo estas separadas em universidades, institutos/centro de pesquisa e empresas (Figura 30). As seis empresas encontradas são voltadas para serviços e proteção ambiental, como setor de tratamento de resíduos e questões hídricas, ou de fabricação de materiais/equipamentos, sendo elas: Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co, Ltd (China); Agile Environmental Protection Group, Yulin Xintao Environmental Protection *Technology* Co., Ltd. (China); Guangdong Guangye Environmental Protection Industrial Group Co., Ltd. (China); ECO Environmental Investment Limited (China); Plastica Alfa SpA (Itália), Step-Up Jewels PVT. Ltd. Khatodara Gate (Índia).

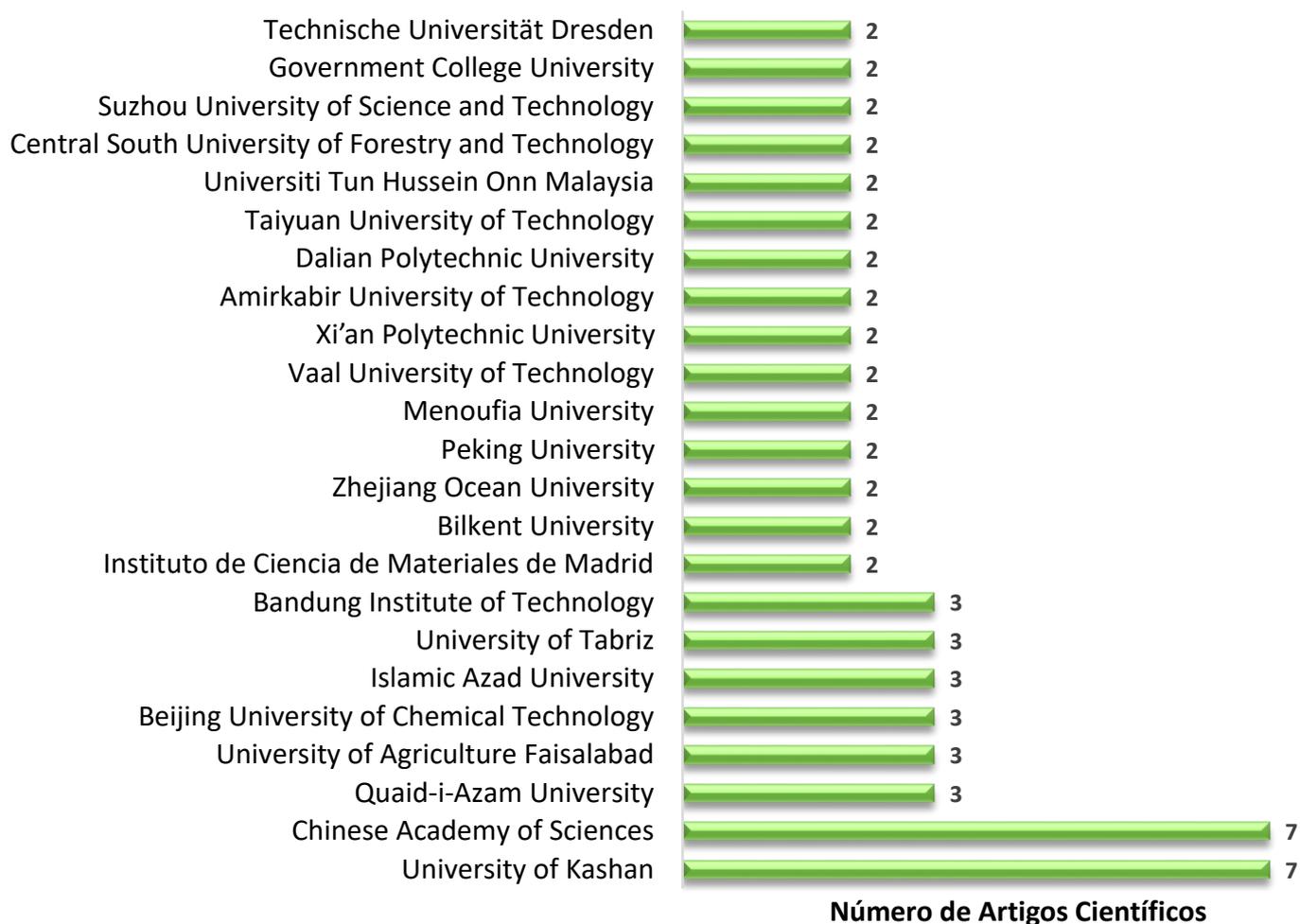
Figura 30 - Artigos científicos separados por tipo de instituição de origem.



Fonte: A autora, 2022.

Foi um total de 33 associações Universidade/Centro de pesquisa, 5 associações Universidade/Empresa e 1 associação Universidade/Centro de Pesquisa/Empresa. Das vinte e duas instituições que mais se destacaram por publicarem dois ou mais artigos, quase que sua totalidade são de universidades, sendo elas iranianas, chinesas, paquistanesas, indonésia, turca, egípcia, sul-africana e malaia, e apenas uma é instituição de pesquisa de origem espanhola (Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid) (Figura 31).

Figura 31 - Seleção das instituições de origem que publicaram pelo menos 2 artigos científicos.



Fonte: A autora, 2022.

A University of Kashan (Irã) e a Chinese Academy of Sciences (China) aparecem como as universidades detentoras do maior número de artigos publicados no período de análise, ambas com sete publicações.

4.1.1.2 Análise meso

Baseadas na fase pré-prospectiva e nos resultados obtidos durante a fase de prospecção tecnológica, foram separadas as seguintes taxonomias (grupos de classificação):

- **Característica do produto final:** estudos para avaliação da performance e aplicabilidade real dos produtos finais no tratamento de efluentes aquosos contaminados por corantes orgânicos sintéticos.
- **Produto final:** estudos de obtenção do nanomaterial que desempenha funções específicas para aplicação nas técnicas de tratamento de efluentes aquosos avaliadas.
- **Matéria-prima do NM:** estudos da metodologia de obtenção do nanomaterial, variando-se os tipos de matérias-primas ou as tendências de métodos de pesquisa encontrados.

Após a definição dos três grupos de taxonomias, foram analisadas as tendências dos artigos selecionados, observando-se o quantitativo desses documentos em cada uma das taxonomias (Figura 32). Pode ser notado que as três classes de taxonomias são representativas, abordadas pela totalidade dos estudos relacionados ao tema escolhido para o trabalho. Vale aqui destacar que o mesmo documento pode possuir mais de uma taxonomia simultaneamente.

Figura 32 - Artigos científicos separados pelas taxonomias adotadas.



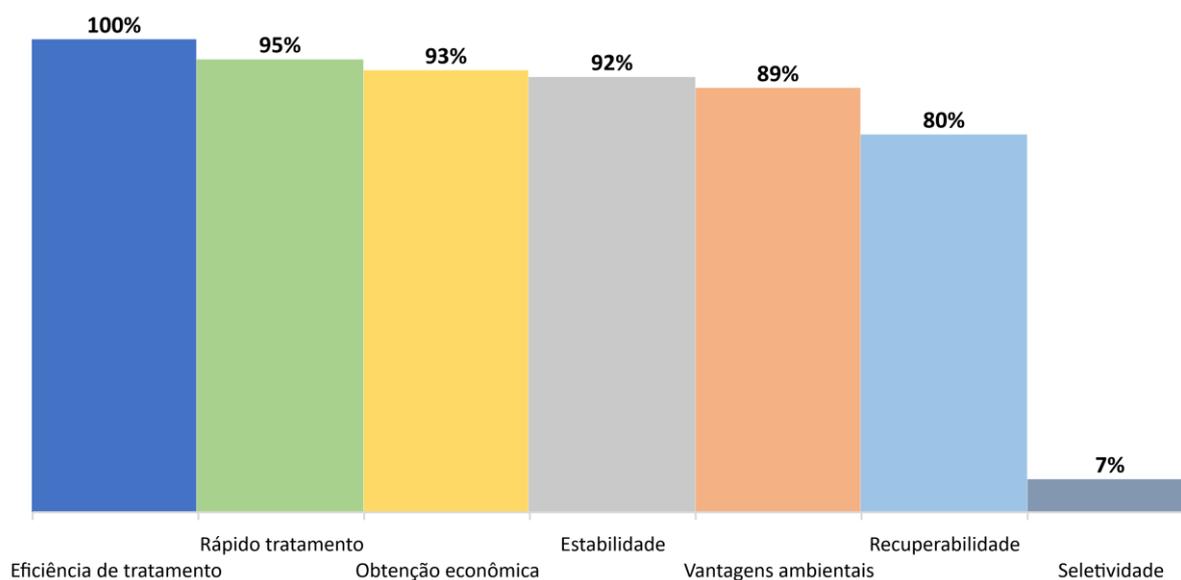
Fonte: A autora, 2022.

4.1.1.3 Análise micro

Na análise Micro são detalhadas todas as taxonomias adotadas. Em relação a taxonomia “Característica do produto final”, esta foi dividida em sete categorias e analisada, de maneira que represente mais especificamente o tipo de característica do produto desenvolvido avaliada e

evidenciada nos estudos. São elas: Obtenção econômica, Recuperabilidade, Seletividade, Eficiência de tratamento, Rápido tratamento, Estabilidade e Vantagens ambientais (Figura 33).

Figura 33 - Porcentagem dos artigos científicos que abordaram cada uma das sete classes da “Característica do produto final”.



Fonte: A autora, 2022.

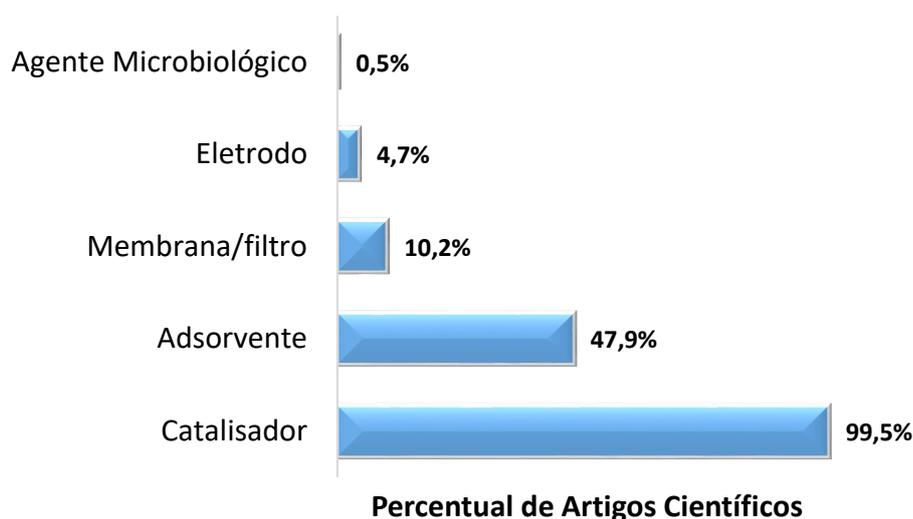
Apesar da totalidade dos estudos abordarem a eficiência de tratamento, existem outras três características que também mostram ser de grande interesse e relevância para os pesquisadores, como a rápido tratamento, obtenção econômica e estabilidade presentes em mais de 90% dos artigos analisados. Com menor representatividade, mas ainda com quantitativos expressivos, aparecem as vantagens ambientais (89%) e recuperabilidade (80%).

Para a presença da característica seletividade (7%) nos documentos analisados, poucos foram os estudos que tiveram o interesse de explorar e garantir esse aspecto no produto desenvolvido. Dos quinze estudos realizados, dez foram exclusivamente por universidades e cinco por parcerias entre universidades, institutos de pesquisa e empresa, com aparições mais significativa a partir de 2018, mostrando ser um interesse mais recente por essa propriedade.

O “Produto final” foi a segunda taxonomia observada nos artigos selecionados e analisada sob o aspecto das funções específicas desempenhas pelo NM projetado para aplicação

no tratamento de efluentes aquosos. Assim, pôde ser notado quais são as funções mais garantidas nos estudos (Figura 34).

Figura 34 - Porcentagem dos artigos científicos que abordaram cada um dos cinco tipos de funções do “Produto final”.



Fonte: A autora, 2022.

Observa-se que a produção do NM é destinada, primordialmente, a função de catalisador heterogêneo, abrangendo quase que a totalidade dos estudos. A segunda função com maior representatividade é adsorvente, com quase metade dos artigos analisados, seguido por membrana/filtro, eletrodo e agente microbiológico que se mostram menos significativos.

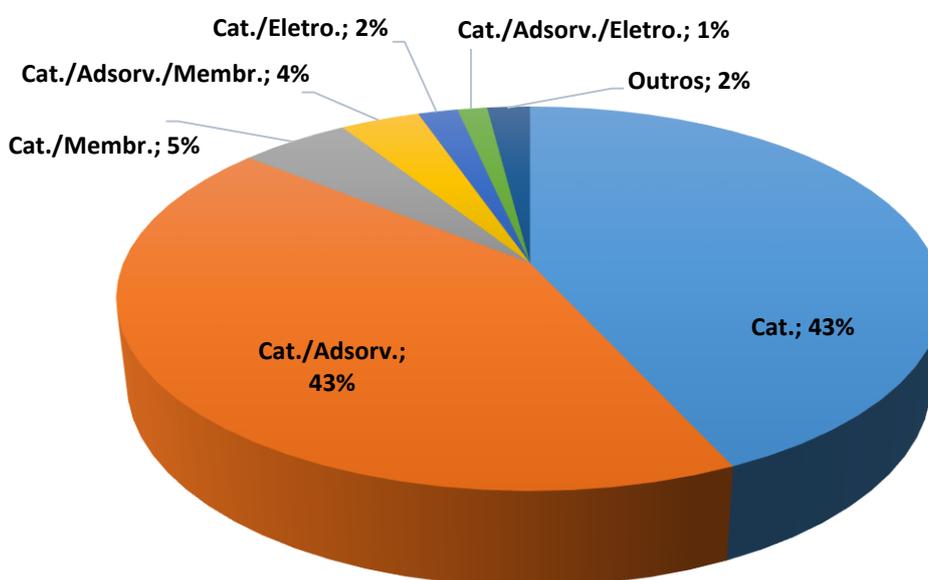
Para a função de agente microbiológico, esta foi abordada por apenas um artigo pertencente a universidade chinesa University of Science and Technology of China (2015), que estudou a produção de nanopartículas de bio-paládio (Pd) por um agente biológico (*Caldicellulosiruptor saccharolyticus*) e a aplicação conjunta do nanocatalisador Pd e das bactérias (que contém a enzima hidrogenase (bio-H₂)) para a degradação do corante laranja de metila.

Assim, fica evidente a possibilidade de existir uma ação combinada de funções, ou seja, o produto final desenvolvido pode assumir uma ou múltiplas funções, devido ao fato da existência de uma estrutura única multifuncional e/ou diferentes estruturas desempenhando as funções relatadas. A maioria dos desenvolvimentos relatados confecciona produtos que apresentam na mesma estrutura variadas funções, proporcionando a existência de efeitos

sinérgicos dos diferentes processos de tratamento (catalítico, adsorção, filtração, eletroquímico e biológico).

Levando em consideração essa possibilidade da ocorrência simultânea das funções, seja pela presença de um ou mais materiais, foi analisado as combinações estabelecidas a fim de apurar como elas estão distribuídas pelos artigos selecionados (Figura 35).

Figura 35 - Porcentagem dos artigos científicos que abordaram as diferentes combinações de funções no “Produto final”.

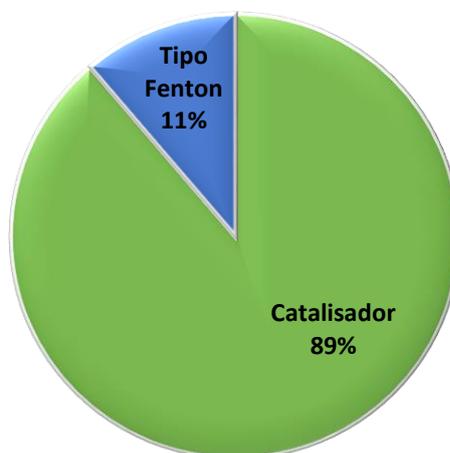


Fonte: A autora, 2022.

Interessante notar que a combinação catalisador/adsorvente e apenas a função catalisador apresentam a mesma representatividade nos estudos analisados. Já as demais associações de funções aparecem em menor destaque, mas mostram a possibilidade real de desenvolvimento de produtos com multi funções e essa tendência de inovação no setor de tratamento de efluentes aquosos.

A fim de elucidar a função catalisador no produto final, visto a sua maior representatividade, de maneira que seja possível ter um melhor entendimento dos detalhes do processo catalítico envolvido, é possível avaliar a existência de algum tipo específico de catalisador empregado (Figura 36).

Figura 36 – Porcentagem dos artigos científicos que abrangem os dois tipos de classes de catalisadores.

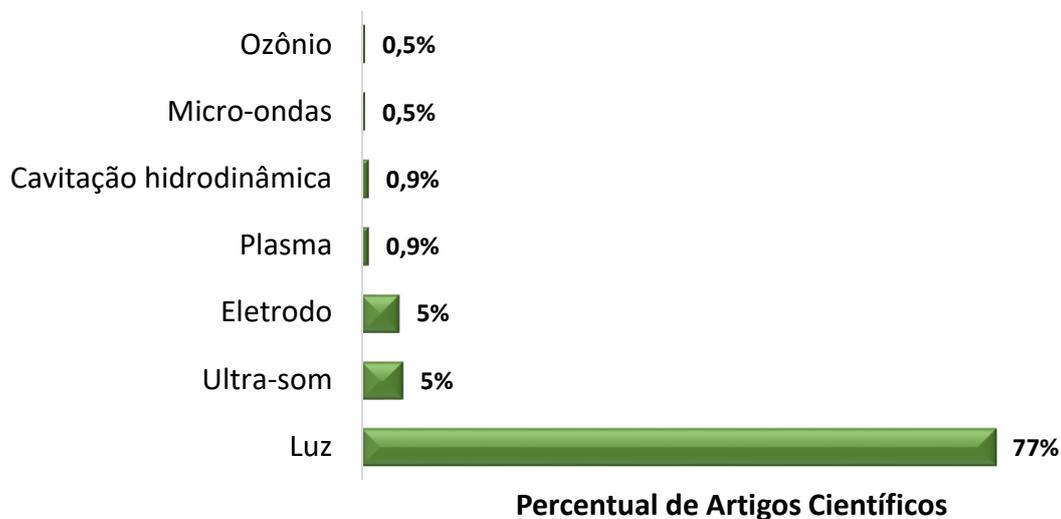


Fonte: A autora, 2022.

Os catalisadores relatados de forma genérica, sem nenhuma classificação específica, são os que possuem maior representatividade nos artigos selecionados, mas nota-se a menção por catalisadores do tipo Fenton em vinte e quatro documentos. Dentre esses, dois são de produções brasileiras, um exclusivamente pela Universidade Federal de Itajubá (2020) e outro pela parceria da Universidade Federal de Lavras com o instituto de pesquisa americano Bioproducts Research Unit (2017).

Uma outra análise interessante foi a identificação da existência de dispositivos combinados ao tratamento, a fim de garantir a degradação do corante orgânico sintético (Figura 37).

Figura 37 - Porcentagem dos artigos científicos que empregam a associação de dispositivos e/ou aditivos ao tratamento.



Fonte: A autora, 2022.

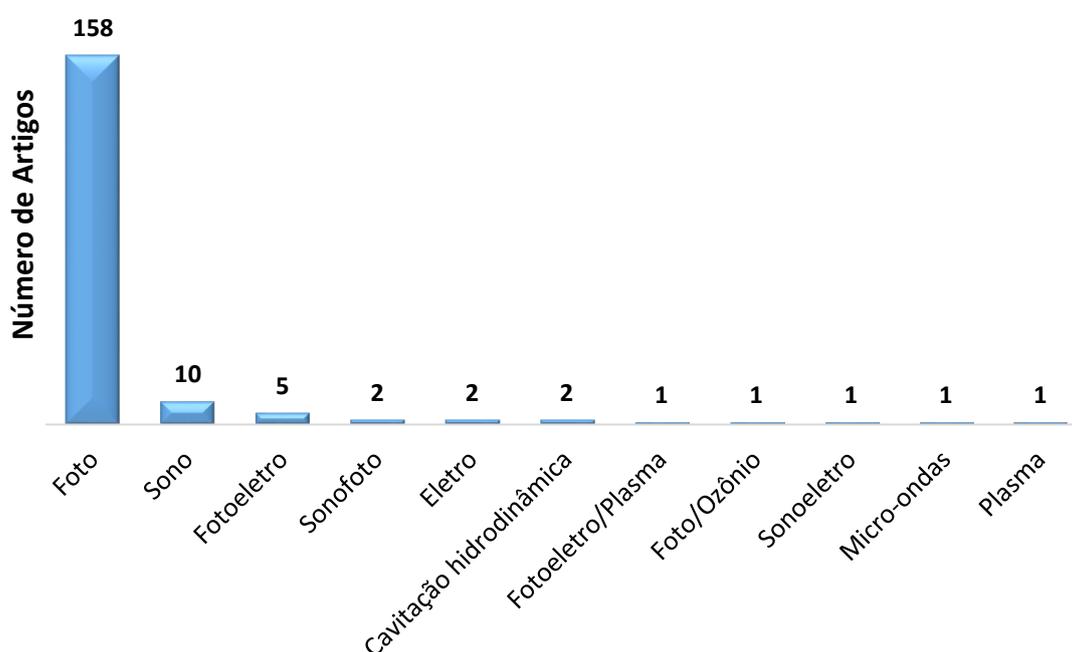
Evidencia-se o grande interesse dos estudos por processos foto assistidos, ou seja, processos acompanhados por uma fonte de radiação luminosa (UV-Vis), visto o maior volume de artigos que o mencionam. Na sequência, tem-se na segunda posição os processos assistidos por ultra-som, junto com eletrodo, seguido pelo uso do plasma, cavitação hidrodinâmica (CH)², micro-ondas e ozônio (ozonização) com menores representatividades. A respeito desses quatro últimos tipos de dispositivos/aditivos utilizados nas técnicas de tratamento, as publicações foram exclusivamente de universidades chinesas e indianas, sendo dois artigos que relatam a utilização de plasma, elaborados pelas universidades chinesas Nantong University (2021) e University of Science and Technology Beijing (2019); também dois artigos que abordam a cavitação hidrodinâmica, desenvolvidos pelas universidades chinesas Liaoning University (2020) e Tongji University (2015); um artigo que faz a menção de uso do micro-ondas, elaborado pela universidade indiana Jamia Millia Islamia (A Central University) (2014); e um artigo que relata a utilização de ozônio (ozonização) da universidade indiana Alagappa University (2015).

Dentre os 182 artigos que mencionam esses tipos de dispositivos e/ou aditivos associados à técnica de tratamento, nota-se que o uso destes pode ocorrer de forma independente, mas

² A cavitação hidrodinâmica (CH) destaca-se como um processo oxidativo avançado (POA) caracterizada pela geração, subsequente crescimento e colapso de cavidades com elevada transferência de energia, em curto intervalo de tempo.

também com a possibilidade de atuação conjunta, a fim de melhorar o desempenho do tratamento (Figura 38). Vale aqui ressaltar que não está excluída a possibilidade de também ter a adição de agentes oxidantes ou redutores de ativação no meio reacional, exemplos do H_2O_2 (peróxido de hidrogênio) e do $NaBH_4$ (borohidreto de sódio) comumente utilizados.

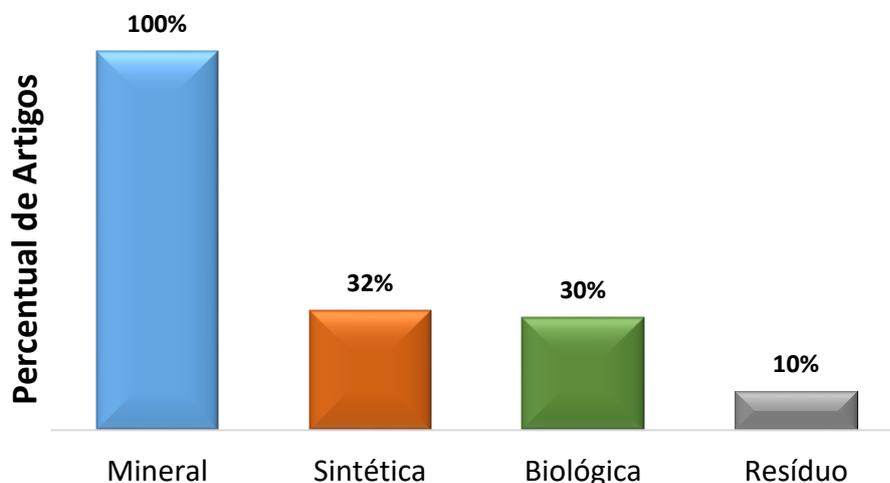
Figura 38 – Distribuição das diferentes formas de utilização dos dispositivos/aditivos nos processos de tratamento.



Fonte: A autora, 2022.

A terceira e última taxonomia a ser analisada é a “Matéria-prima do NM”, que foi dividida e analisada sob a ótica dos insumos empregados na fabricação do nanomaterial. A matéria-prima predominante e presente em todos os artigos é a mineral, seguido da sintética, biológica e resíduo (Figura 39).

Figura 39 – Porcentagem dos artigos científicos que abordam as diferentes classes da “Matéria-prima do NM”.

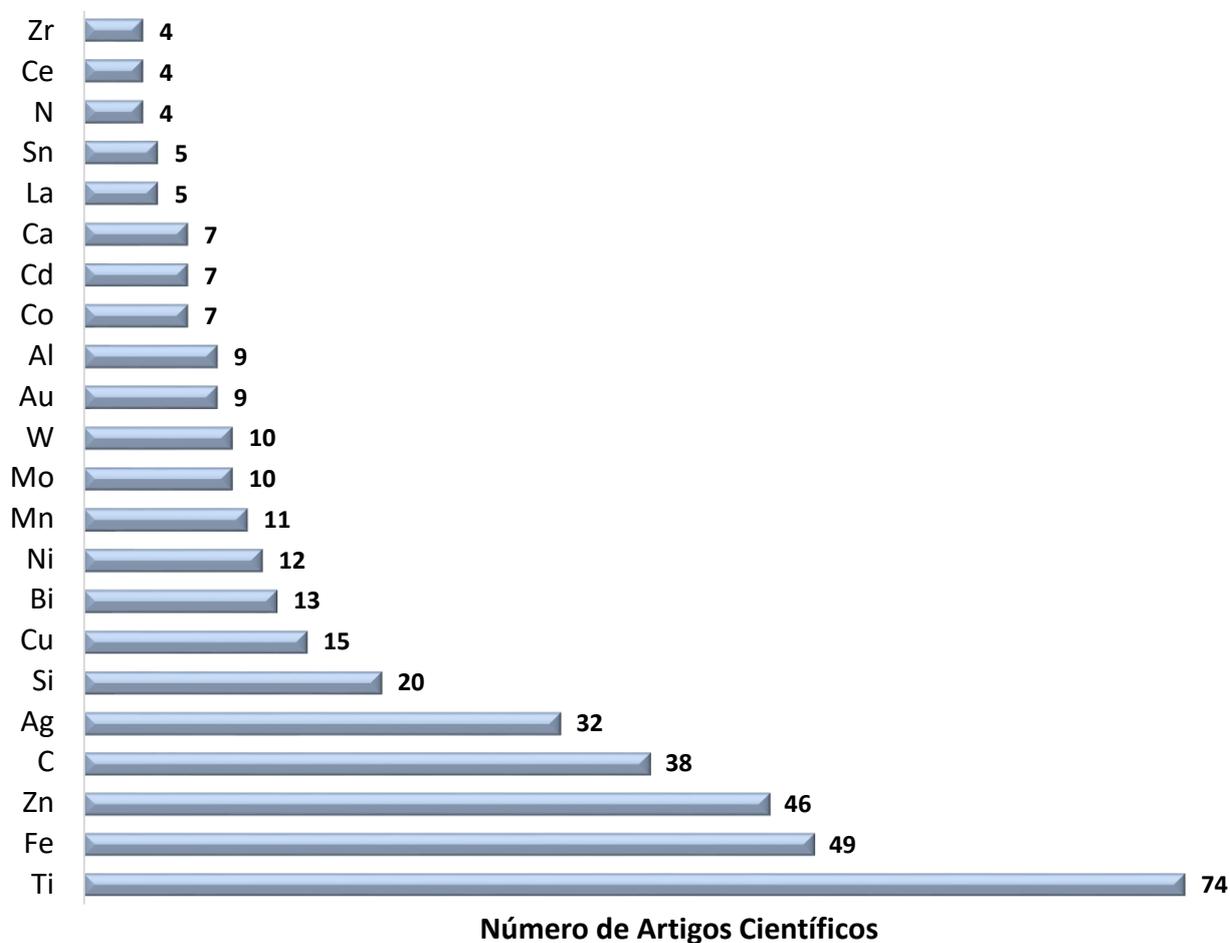


Fonte: A autora, 2022.

A presença da classe mineral como a principal fonte dos elementos constituintes dos NMs desenvolvidos pode ser justificada pelo fato da expressividade na produção de catalisadores heterogêneos sintéticos e adsorventes observada nos artigos, funções desempenhadas, essencialmente, por substâncias compostas por espécies metálicas, seja na forma isolada ou como óxidos, oxihidróxido, sulfetos, selenetos, haletos, fosfatos, nitretos metálicos e outros; e carbonáceas (a partir do grafite).

Dessa forma, detalhando um pouco mais essa classe de matérias-primas, é possível verificar quais são os elementos químicos predominantes na estrutura final dos NMs desenvolvidos (Figura 40). Vale lembrar que a composição dos NMs não está limitada a uma única espécie, seja pela presença dessas espécies compondo a mesma ou diferentes substâncias químicas, e que nessa análise está sendo verificada essencialmente as espécies inorgânicas contituíntes.

Figura 40 - Elementos químicos que compõem os NMs que aparecem em pelo menos 4 artigos científicos.



Fonte: A autora, 2022.

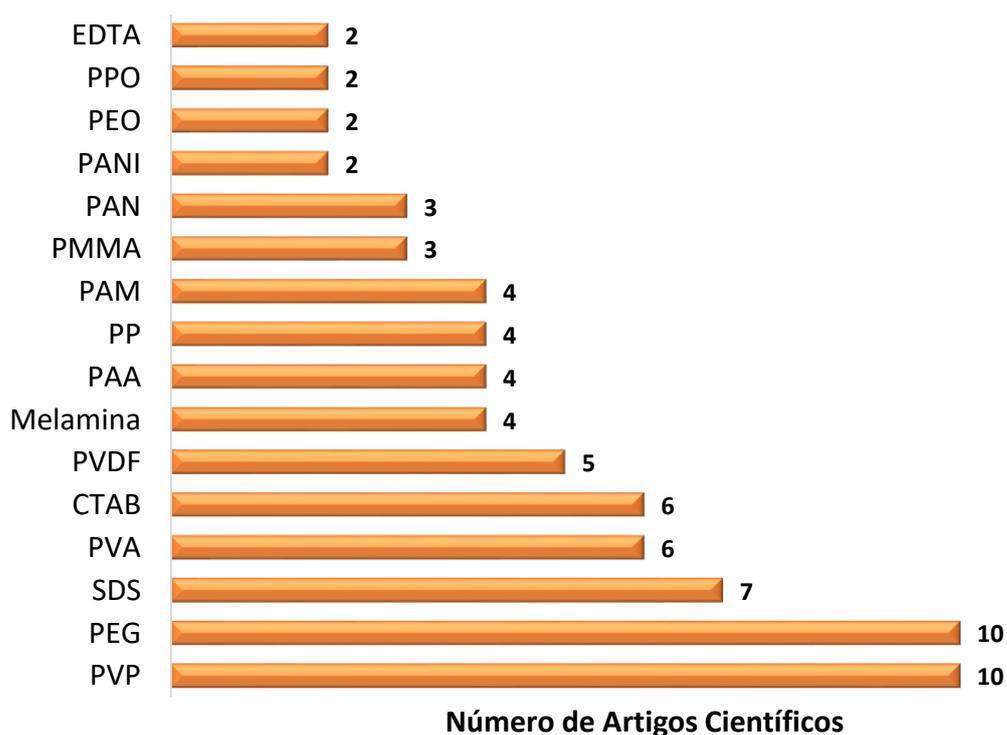
O destaque é para o titânio, que possui a maior representatividade dos metais utilizados, seguido do ferro, zinco, carbono e prata. A forma de utilização predominante desse metal é sob a forma de dióxido de titânio (TiO_2). Cabe mencionar que a presença do carbono, um não metal, é devido ao fato da presença dos seus alótropos sintéticos ou naturais (grafeno, nanotubos, grafite), pontos quânticos³ e nitretos.

Voltando às outras classes de matérias-primas, nota-se que a segunda classe mais utilizada é a sintética, com 32% dos artigos relatando o seu uso na produção dos NMs. Assim,

³ Pontos quânticos de carbono ou CQDs, do inglês Carbono Quantum Dots, são, como o próprio nome informa, pontos quânticos montados a partir de estruturas contendo majoritariamente átomos de carbono.

obtendo um maior detalhe sobre esse conjunto, pôde ser verificado as principais substâncias utilizadas pelos estudos (Figura 41).

Figura 41 - Materiais sintéticos utilizados na obtenção dos NMs que aparecem em pelo menos 2 artigos científicos.



Fonte: A autora, 2022.

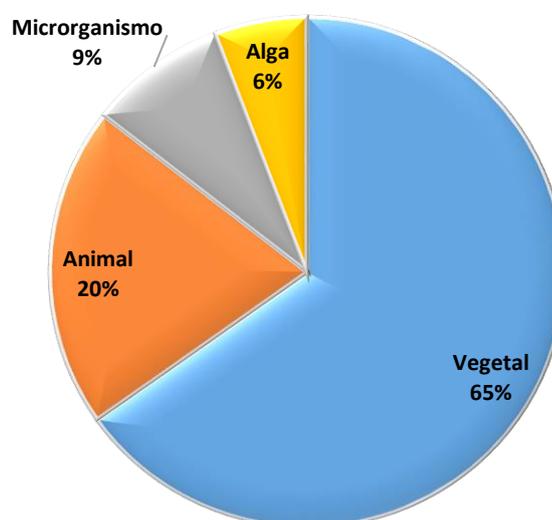
A função desempenhada pelos materiais sintéticos é, em sua grande maioria, como suporte/imobilização das NPs, seja de forma direta, através de confecção fibras, géis, membranas; ou indireta, pelo uso como substância precursora do suporte (exemplo, a melamina, trímico da cianamida, que é utilizada para a obtenção do nitreto de carbono grafítico, $g-C_3N_4$), que pode também contribuir para produtos finais com as funções adsorvente e filtrante. Porém, também pode ser verificado o uso como agente de funcionalização, modificação e estabilização, destinados a melhorar algumas propriedades e o desempenho dos NMs obtidos.

Tratando-se das matérias-primas de origem biológica, estas aparecem na terceira posição com 30% dos artigos relatando o seu uso nos NMs, patamar bem próximo ao verificado para os materiais sintéticos (32%). Desse modo, pode ser notado a tendência de escolha por insumos ambientalmente amigáveis, o que contribui para a redução dos riscos de impactos

ambientais durante a produção, o uso e na disposição final dos NMs, além de serem materiais de baixo custo. A utilização dessa classe de substâncias tem objetivos diversos, que pode ser para desempenhar a função de suporte/imobilização (carvão, fibras vegetais), que pode também contribuir para produtos finais com a função adsorvente; agentes oxidantes ou redutores (extratos vegetais e microrganismos); agente de funcionalização, modificação e estabilização (extratos vegetais, hialuronato de sódio (SH), o-carboximetilquitosana (CMC) combinado com extratos aquosos de folhas de ginseng); precursor direto de nanopartículas (pontos de carbono sintetizados por carbonização hidrotérmica de bagas de Lantana camara); agente de cobertura (mel); agente microbiológico; e biocatalisadores (enzimas).

Obtendo um detalhe maior dessa classe biológica, é possível verificar de qual origem tratam-se esses materiais relatados (Figura 42). A origem que recebe maior destaque é a vegetal, representando quase 70% da classe biológica, seguido da origem animal, microrganismo e alga.

Figura 42 - Porcentagem dos artigos científicos que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Biológica.



Fonte: A autora, 2022.

Dos seis artigos que utilizam a origem de microrganismos, cinco são exclusivamente de universidades chinesas: dois documentos relatam a aplicação de celulose bacteriana (BC), sendo um no desenvolvimento de uma membrana de nanocelulose bacteriana (BNC) carregada com nanopartículas de óxido de grafeno (GO) e paládio (Pd) (Pd/GO/BNC), publicado pela universidade Donghua University (2018), e um no uso da BC para imobilização do tetra-amino

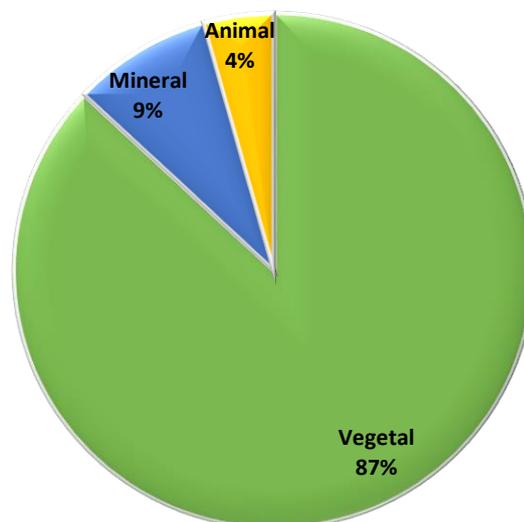
cobalto (II) ftalocianina (CoPc) (CoPc@BC), desenvolvido pela universidade Hangzhou Normal University (2017); um terceiro artigo relata a aplicação da enzima lacase (Lac) imobilizada em nanocompósito de poli(p-fenilenodiamina) (PpPD) e em nanopartículas de Fe_3O_4 (Lac/PpPD/ Fe_3O_4), para obter biocatalisadores magnéticos, produzido pela Xinxiang Medical University (2016); o quarto documento aborda a utilização de culturas celulares da bactéria *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* como agente microbiológico e também como responsável pela produção das nanopartículas de bio-paládio (Pd) para atuação combinada na degradação do corante, desenvolvido pela University of Science and Technology of China (2015); e o quinto artigo relata o uso do fungo, *Trichoderma sp.* WL-Go, que através da secreção de grandes quantidades de enzimas metabólicas e proteínas extracelulares, que atuam como agentes redutores e capeadores, promovem a síntese de nanopartículas de seleneto de chumbo (PbSe), produzido pela Dalian University of Technology (2020). Já o sexto artigo, pertencente à universidade paquistanesa Government College University (2020), relata o uso de uma cepa bacteriana, *Bacillus marisflavi* (TEZ7), como uma rota verde para a síntese de nanopartículas de prata (AgNPs), que ocorre devido a liberação extracelular de proteínas, peptídeos, açúcares e outros metabólitos que atuam como agentes redutores e estabilizantes.

Já para os quarto artigos que abrangem a origem de algas: três referem-se ao uso da substância alginato de sódio (SA) associado a um polímero (PVP, PSF) ou biopolímero (Goma-guar) para compor uma matriz de imobilização para os nanocatalisadores WO_3 , $\text{TiO}_2/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ e Ag, respectivamente, publicados no ano de 2020 e de origem egípcia, chinesa e Indiana; e um refere-se ao uso de algas frescas para produção de um biocarvão (AKB: biocarvão de algas carbonizadas), que atua como adsorvente e como suporte para o catalisador Bi_2MoO_6 ($\text{Bi}_2\text{MoO}_6/\text{AKB}$), desenvolvido pela universidade chinesa Zhejiang Ocean University (2018).

A classe de resíduos, que apesar de apresentar uma menor abrangência pelos artigos, mostra a busca pelo reaproveitamento de materiais que seriam descartados, reduzindo as cargas ambientais e trazendo ganhos consideráveis para o meio ambiente, além de serem interessantes sob aspecto econômico, por serem materiais de baixo custo e proporcionarem NMs mais baratos comercialmente. Os artigos desse conjunto possuem maior ocorrência a partir do ano de 2018, mostrando ser uma motivação mais recente dentre os pesquisadores.

Uma análise e divisão dos resíduos foi feita com relação ao tipo de origem do material envolvido. Assim, verifica-se que o resíduo predominante é o de origem vegetal, seguido da origem mineral e animal (Figura 43).

Figura 43 - Porcentagem dos artigos científicos que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Resíduo.

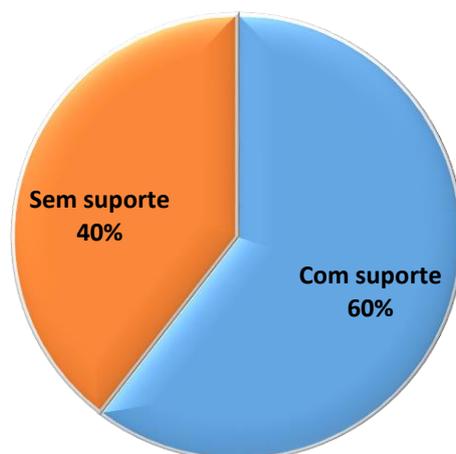


Fonte: A autora, 2022.

Dos dois artigos que abordaram os resíduos minerais, um foi feito pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2020), que utiliza resíduos de pó de vidro para compor parte de uma estrutura cerâmica porosa que servirá de suporte para o catalisador TiO_2 ; e o outro elaborado pela universidade chinesa Taiyuan University of Technology (2018), que utiliza o resíduo cenosferas de cinzas volantes (FAC) como carreador para acoplar o catalisador Ag-TiO_2 . Já o único artigo que aborada o resíduo de origem animal, relata o uso de casca de ovo como material de suporte para o catalisador ZnO/CuO , feito pela universidade etíope Debre Berhan University (2021).

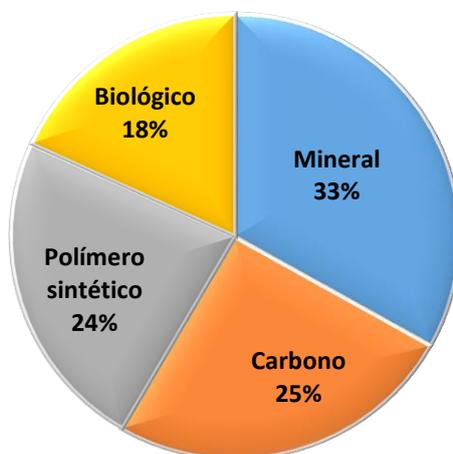
Uma última análise e abertura feita para as matérias-primas é a avaliação da presença de materiais que atuam como estruturas para suporte ou imobilização das NPs (Figura 44 e 45).

Figura 44 - Porcentagem dos artigos científicos que abordam a presença de suportes catalíticos.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 45 - Tipos mais comuns de materiais que desempenham a função de suporte catalítico nos artigos científicos.



Fonte: A autora, 2022.

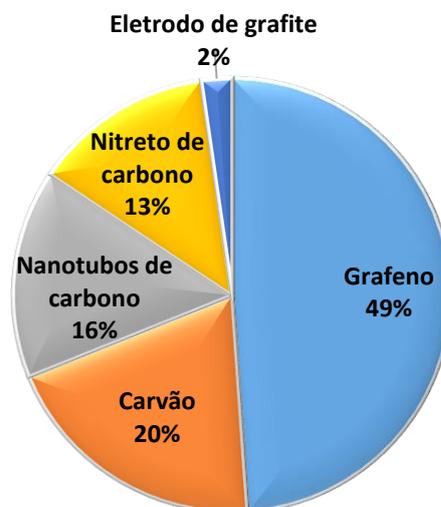
Observa-se que a presença de uma suportação nos NMs desenvolvidos é predominante nos artigos selecionados para o estudo, o que já demonstra uma certa propensão ao

desenvolvimento de materiais com essas características. A imobilização dos catalisadores traz diversas vantagens para o processo de tratamento do efluente, desde um melhoramento na performance dos materiais catalíticos, até a maior facilidade para recuperação do material e a reduzida possibilidade de sua perda, o que poderia levar a uma contaminação secundária durante sua utilização.

O tipo de material que desempenha a função de suporte de maior destaque nos artigos analisados é o mineral (33%), seguido do carbonáceo, polímero sintético e biológico. A presença de materiais de origem mineral como principal destaque, deve-se ao fato de existirem NMs que possui em um de seus componentes metálicos uma estrutura sob a forma de fibras, tubos, folhas, lâminas, que acabam por desempenhar a função de suporte das outras espécies constituintes, além de também ser notado a presença do dióxido de silício (SiO_2), materiais cerâmicos/argilosos, eletrodos (titânio e óxido de estanho dopado com flúor (FTO)), substratos condutores de óxido de flúor estanho (FTO), nanofolhas de carbonoeto de molibdênio (Mo_2C), membrana tubular porosa de titânio, cenosferas de cinzas volantes (FAC, compostos de silício e alumínio), aço inoxidável austenítico e casca de ovo, que apesar de ser origem biológica animal, é de composição mineral (carbonoato de cálcio e de magnésio).

Ocupando a segunda posição de destaque, tem-se os materiais carbonáceos e, devido a notoriedade que o carbono apresentou na análise dos principais elementos contituíntes dos NMs anteriormente, foi feita uma subdivisão para um melhor entendimento e identificação dessas estruturas (Figura 46).

Figura 46 – Tipos de suportes catalíticos carbonáceos identificados nos artigos científicos.



Fonte: A autora, 2022.

Nota-se o grande interesse na utilização do grafeno, um material produzido, principalmente, a partir do grafite e que vem recebendo grande destaque devido suas incríveis propriedades físicas e químicas, possibilitando o melhoramento das características e performance dos NMs desenvolvidos. Na sequência, tem-se a presença do carvão, nanotubos de carbono (CNTs), nitreto de carbono grafítico ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) e eletrodo de grafite (GE). Dentre essas opções carbonáceas, o carvão e o $g\text{-C}_3\text{N}_4$ são as opções de mais baixo custo e simplicidade para obtenção. Vale ressaltar que o carvão foi considerado um suporte carbonáceo, apesar de ter origem biológica vegetal, devido a predominância do carbono em sua estrutura.

Apesar de possuir a menor representatividade, a presença de materiais biológicos nas novas tecnologias de produção dos NMs evidencia a intenção de desenvolver produtos mais sustentáveis. Nessa classe, tem-se a presença materiais com a celulose (vegetal ou bacteriana), quitosana, lignina, goma-guar, alginato de sódio (SA), gelatina, aquaporina (AqP), amido, lã, algodão, casca de laranja, madeira, brácteas de milho, erva-mate e fibras de sisal.

Com relação aos materiais sintéticos, as substâncias de maior destaque já foram mencionadas anteriormente no detalhamento das matérias-primas de origem sintética.

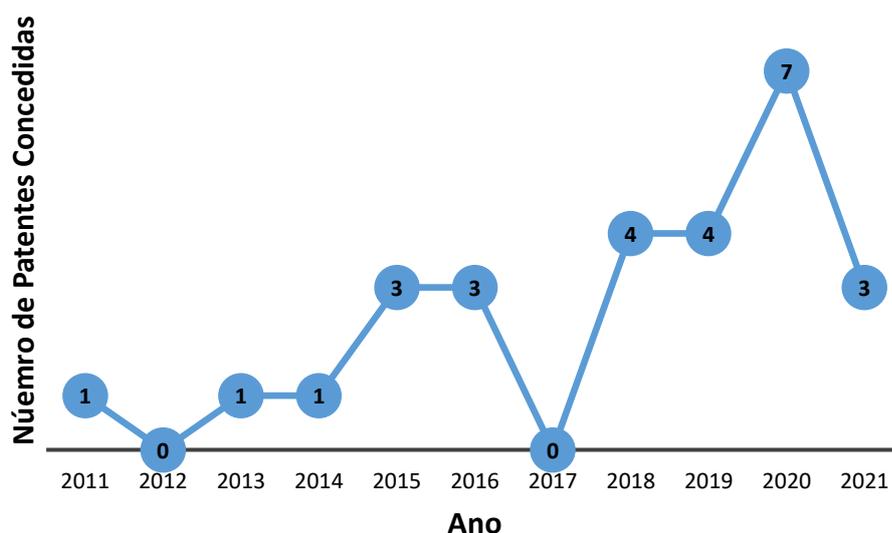
4.1.2 Prospecção tecnológica – patentes concedidas

4.1.2.1 Análise macro

Para a análise das patentes concedidas foram utilizados os 27 documentos relevantes encontrados (Apêndice B).

A série histórica abrangeu o período de onze anos, com as datas de publicação das patentes relevantes variando de 2011 a 2021. O maior volume de patentes por ano atualmente se encontra no ano de 2020, com um total de 7 patentes concedidas (Figura 47).

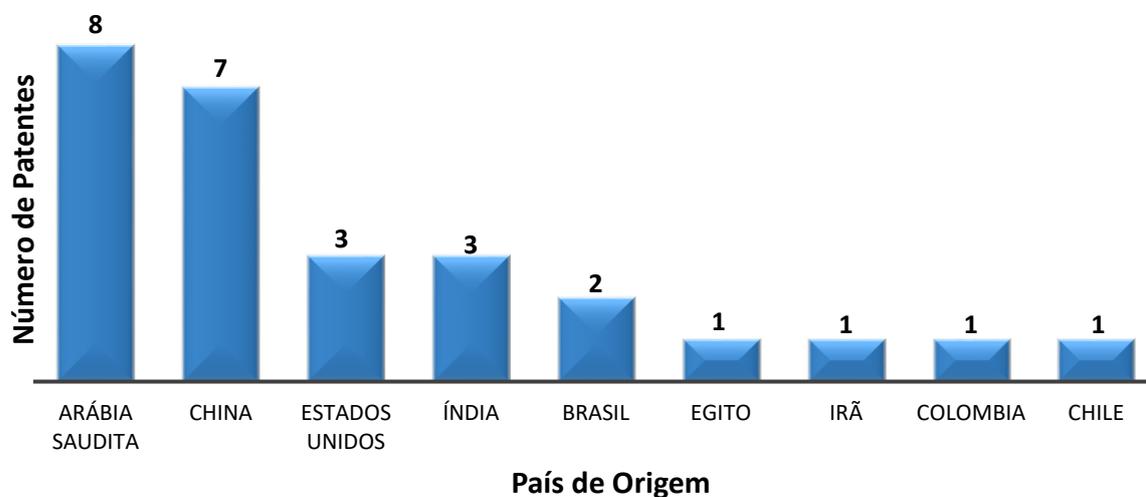
Figura 47 - Série histórica das patentes concedidas.



Fonte: A autora, 2022.

Com relação à distribuição de patentes concedidas por país de origem, a Arábia Saudita lidera com 8, seguida da China com 7 e dos EUA, junto com a Índia, em terceiro lugar com 3 patentes cada (Figura 48). O Brasil ocupa o quarto lugar com 2 patentes. Vale ressaltar que as patentes brasileiras localizadas foram, exclusivamente, através da base INPI.

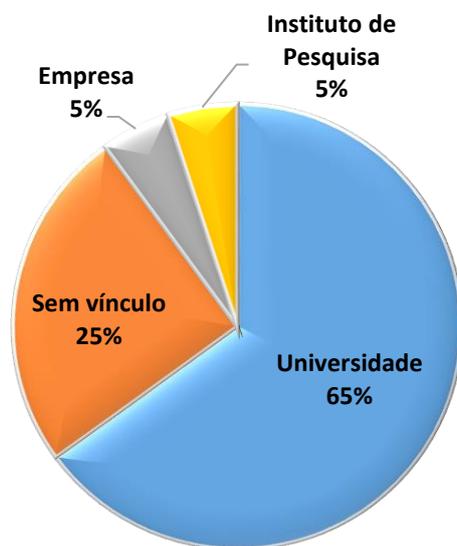
Figura 48 - Patentes concedidas separadas por país de origem.



Fonte: A autora, 2022.

Das instituições cessionárias, ou seja, que detém a tecnologia das patentes, foram encontradas 13 universidades, 5 sem vínculo, 1 empresa e 1 instituto de pesquisa (Figura 49). Este resultado mostra que o domínio da tecnologia de fabricação dos NMs destinados ao tratamento terciário de águas residuais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos é de interesse das universidades predominantemente, seguido dos atores que não apresentam vínculos declarados com nenhuma instituição. O tema ainda desperta pouca atenção por parte das empresas, como dos institutos de pesquisa.

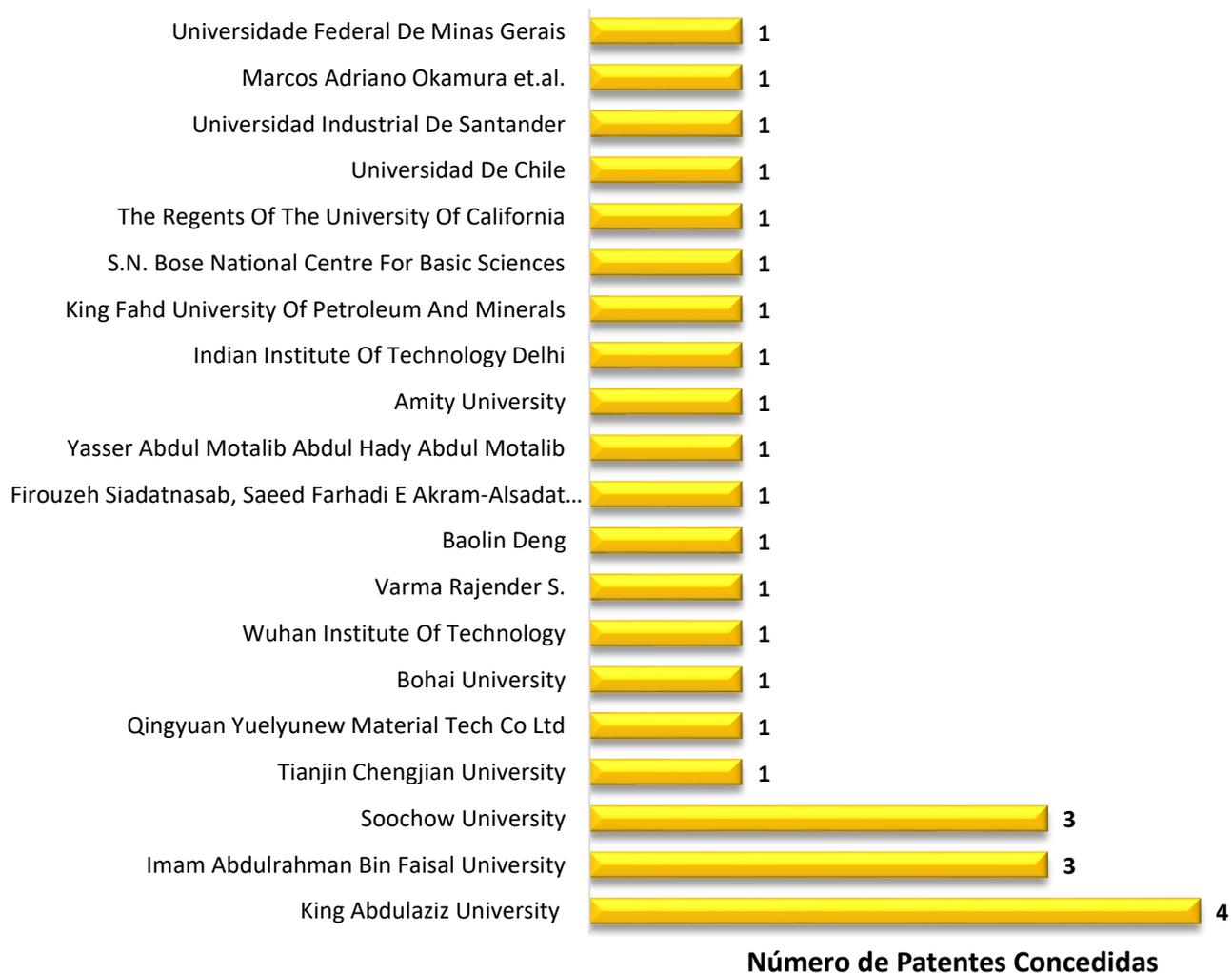
Figura 49 - Patentes concedidas separadas por tipo de instituição de origem.



Fonte: A autora, 2022.

A King Abdulaziz University (Arábia Saudita) aparece como a universidade detentora do maior número de patentes no período de análise, seguida pela Imam Abdulrahman Bin Faisal University (Arábia Saudita) e pela Soochow University (China) (Figura 50).

Figura 50 - Patentes concedidas separadas por cessionários.



Fonte: A autora, 2022.

4.1.2.2 Análise meso

Posteriormente a definição das taxonomias (as mesmas utilizadas para os artigos), foi feita a análise das tendências das 27 patentes relevantes selecionadas. Observa-se, como na análise dos artigos científicos, que os estudos desenvolvidos nas patentes concedidas abrangem completamente as taxonomias consideradas para metodologias de obtenção dos NMs com relação aos tipos de matérias-primas, aplicação do NM no produto final destinado ao tratamento terciário de águas residuais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos e avaliação das suas características (Figura 51).

Figura 51 - Patentes concedidas separadas pelas taxonomias.

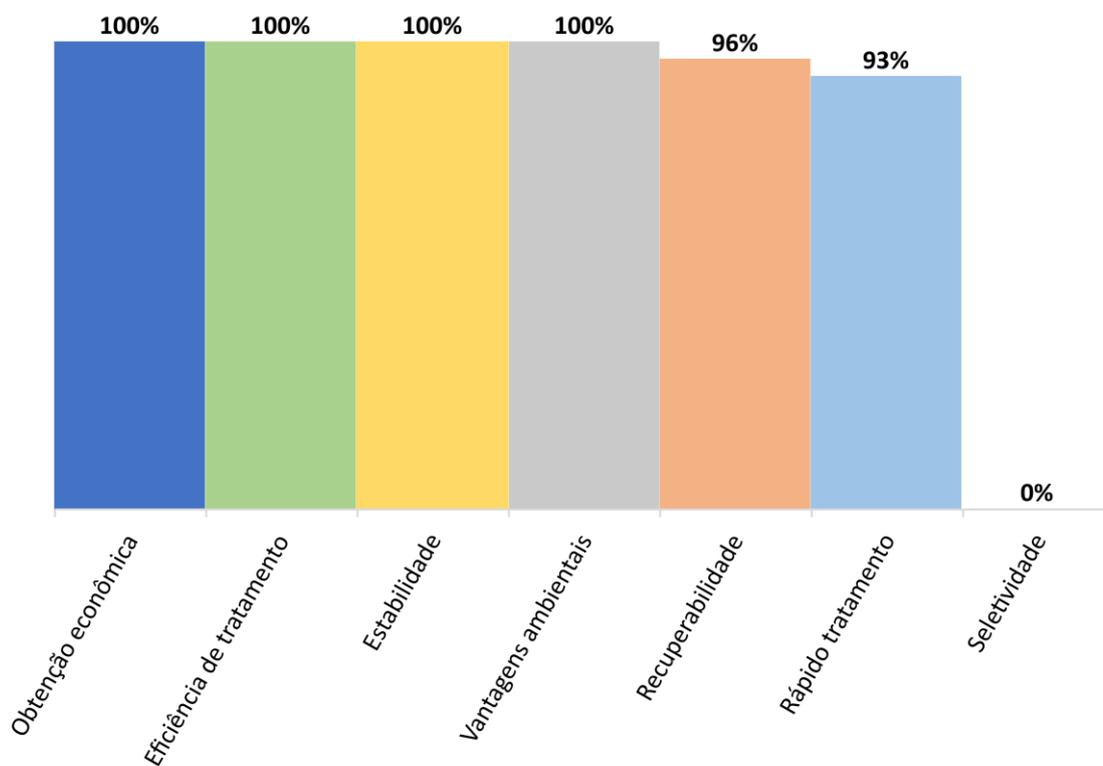


Fonte: A autora, 2022.

4.1.2.3 Análise micro

A “Característica do produto final” foi um dos temas abordados entre as patentes (Figura 52). Como já analisado no caso dos artigos, o foco em características de performance (eficiência, rapidez e estabilidade) e de economicidade de obtenção do produto final é unanimidade também entre os documentos patentários analisados, com mais de 90% de abordagem.

Figura 52 - Porcentagem das patentes concedidas que abordaram cada uma das sete classes da “Característica do produto final”.

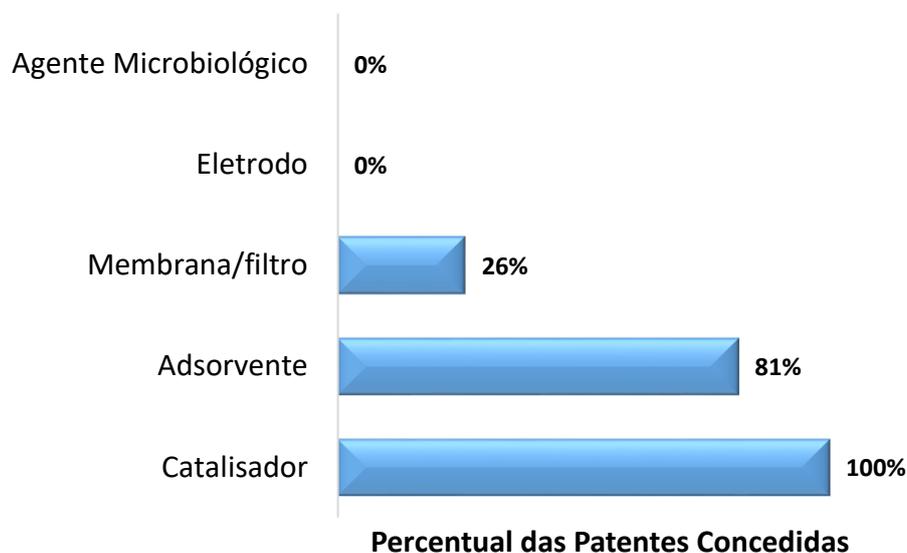


Fonte: A autora, 2022.

Interessante notar que as vantagens ambientais (100%) e recuperabilidade (96%) passam a ser mais representativas dentre as patentes do que nos artigos, mostrando que a tendência de aplicação real nas técnicas de tratamento de águas residuais segue no caminho da garantia de processos mais sustentáveis. Em relação à seletividade conclui-se que nenhuma instituição explorou ou garantiu essa característica no produto desenvolvido, o que pode ser justificado pelo fato de que nos artigos essa foi uma das propriedades pouco exploradas e com aparições mais significativa a partir de 2018, tratando de um interesse ainda incipiente.

Na taxonomia de aplicação como “Produto final”, a análise estabelecida foi sob o aspecto das funções específicas desempenhas pelo NM projetado para aplicação nas técnicas de tratamento de efluentes aquosos. A partir dessa abertura, observa-se quais são as funções mais obtidas nos estudos (Figura 53).

Figura 53 - Porcentagem das patentes concedidas que abordaram cada um dos cinco tipos de funções do “Produto final”.

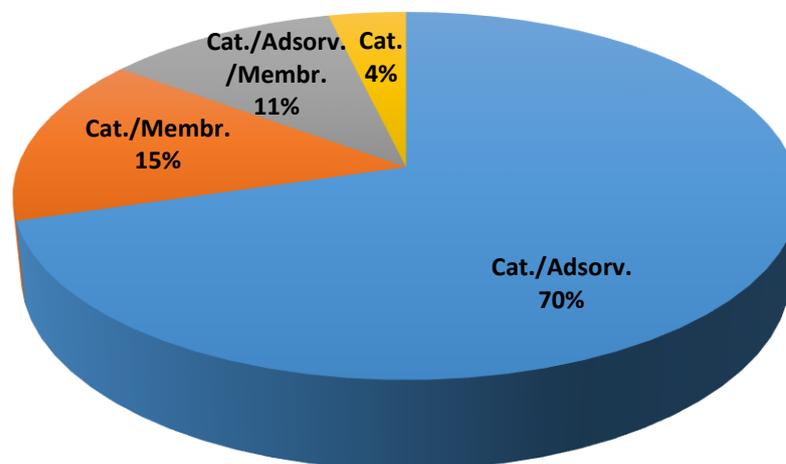


Fonte: A autora, 2022.

Nota-se que a produção do NM é destinada a função catalisador heterogêneo principalmente, abrangendo a totalidade dos estudos, seguido de adsorvente (81%) e membrana/filtro (26%). As funções de eletrodo e de agente microbiológico não foram identificadas em nenhum dos documentos analisados. Assim, torna-se evidente a possibilidade de existir uma ação combinada de funções, ou seja, o produto final desenvolvido pode assumir uma ou múltiplas funções, devido ao fato da existência de uma estrutura única multifuncional e/ou diferentes estruturas desempenhando as funções relatadas. A maioria dos desenvolvimentos relatados confecciona produtos que apresentam na mesma estrutura variadas funções, proporcionando a existência de efeitos sinérgicos dos diferentes processos de tratamento (catalítico, adsorção e filtração).

Levando em consideração essa possibilidade da ocorrência simultânea das funções, seja pela presença de um ou mais materiais, foi analisado as combinações estabelecidas a fim de apurar como elas estão distribuídas pelas patentes concedidas selecionadas (Figura 54).

Figura 54 - Porcentagem das patentes concedidas que abordaram as diferentes combinações de funções no “Produto final”.

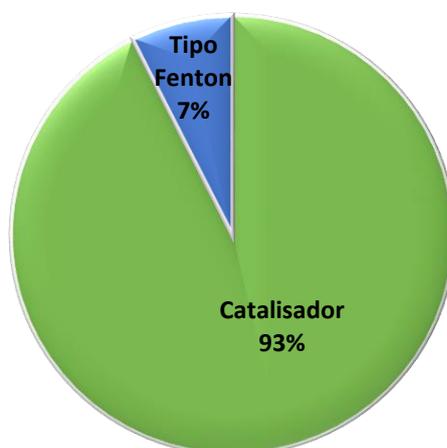


Fonte: A autora, 2022.

Constata-se que a combinação catalisador/adsorvente é o produto que mais se destaca nos documentos analisados, seguido pelo catalisador/membrana, catalisador/adsorvente/membrana e, por último, o uso do catalisador de forma independente representado por uma única patente. Esses quantitativos demonstram o real interesse na superação das limitações e dificuldades que as técnicas utilizadas de forma independente possuem, e que o desenvolvimento de produtos com multi funções é, de fato, uma possibilidade e tendência de inovação no setor de produção de catalisadores destinados ao tratamento de efluentes aquosos.

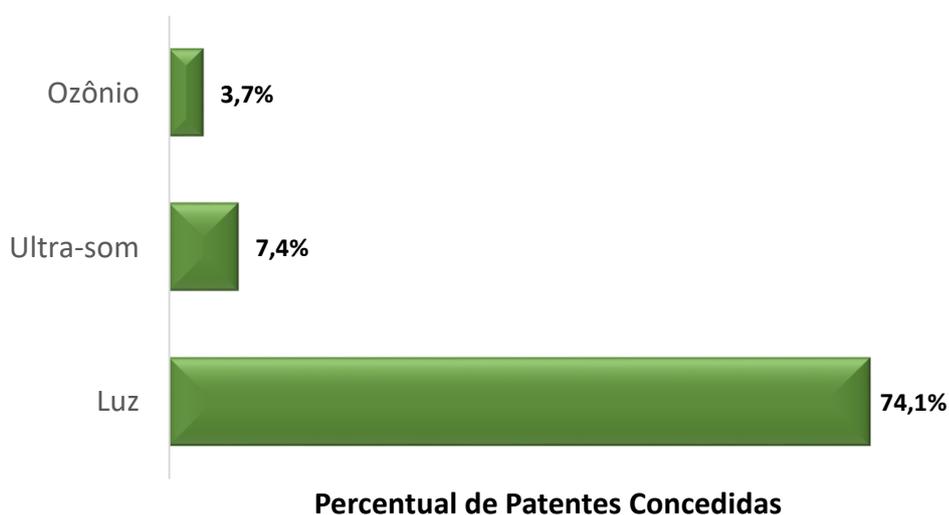
Subdividindo a função catalisador no produto final, de maneira que seja possível ter um melhor entendimento e obter maiores detalhes do processo catalítico envolvido, é possível avaliar a existência de algum tipo específico de catalisador empregado (Figura 55) e a existência de dispositivos combinados (Figura 56).

Figura 55 - Porcentagem das patentes concedidas que abrangem os dois tipos de classes de catalisadores.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 56 - Porcentagem das patentes concedidas que empregam a associação de dispositivos e/ou aditivos ao tratamento.



Fonte: A autora, 2022.

Assim como observado nos artigos, os catalisadores mencionados de forma genérica, ou seja, sem nenhuma denominação específica, são os de maior representatividade nas patentes concedidas selecionadas, mas nota-se a menção por catalisadores do tipo Fenton em dois

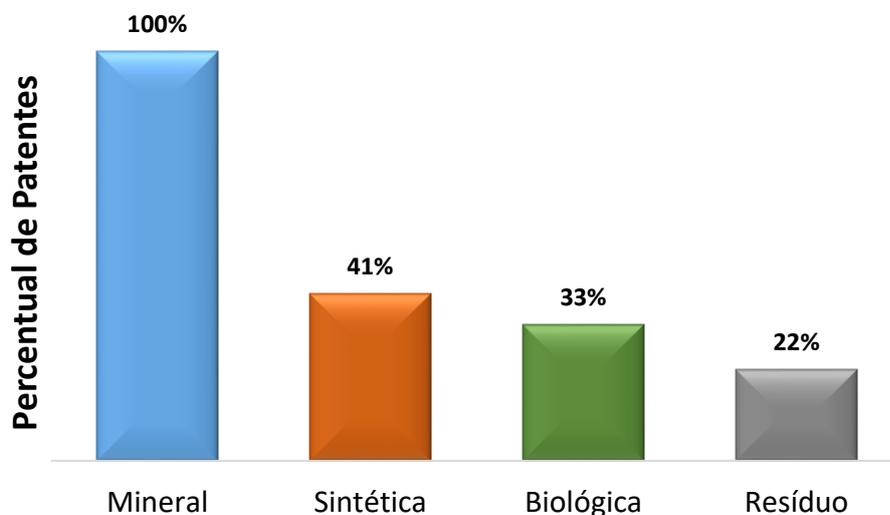
documentos. Dentre esses, ambos são produções chinesas, um desenvolvido pela empresa Qingyuan Yuelunew Material Tech Co., Ltd. (2018), e outro pela universidade Wuhan Institute of Technology (2016).

Observa-se o interesse das patentes pelos processos catalíticos assistidos por uma fonte de radiação luminosa (UV-Vis), focando no desenvolvimento de fotocatalisadores, visto o maior volume de documentos que os mencionam. Na sequência, tem-se os processos catalíticos assistidos por ultra-som (sonocatálise), seguido pelo uso do ozônio (ozonização) com menor representatividade. A patente que aborda a utilização do ozônio em associação com o catalisador desenvolvido (nanopartículas de dióxido de manganês (MnO_2) depositadas sobre superfícies cerâmicas de alumina (Al_2O_3)) é de cessionários brasileiros sem vínculos com instituições (Marcos Adriano Okamura, Carlyle Antonio Cunha e Carlos Salles Lambert, São Paulo, 2015).

Dentre as 21 patentes concedidas que mencionam esses tipos de dispositivos e/ou aditivos associados à técnica de tratamento, nota-se que o uso destes ocorreu de forma independente, ou seja, sem a aplicação de forma conjunta como visto nos artigos. Vale reforçar que, assim como mencionado na análise dos artigos, não está excluída a possibilidade de também ter a adição de agentes oxidantes ou redutores de ativação no meio reacional, exemplos do H_2O_2 (peróxido de hidrogênio) e do $NaBH_4$ (borohidreto de sódio) comumente utilizados.

A última taxonomia a ser analisada é a “Matéria-prima do NM”, dividida e explorada em relação aos insumos empregados na fabricação do NM. A matéria-prima predominante e presente em todas as patentes é a mineral, seguido da sintética, biológica e resíduo (Figura 57).

Figura 57 – Porcentagem das patentes concedidas que abordam as diferentes classes da “Matéria-prima do NM”.

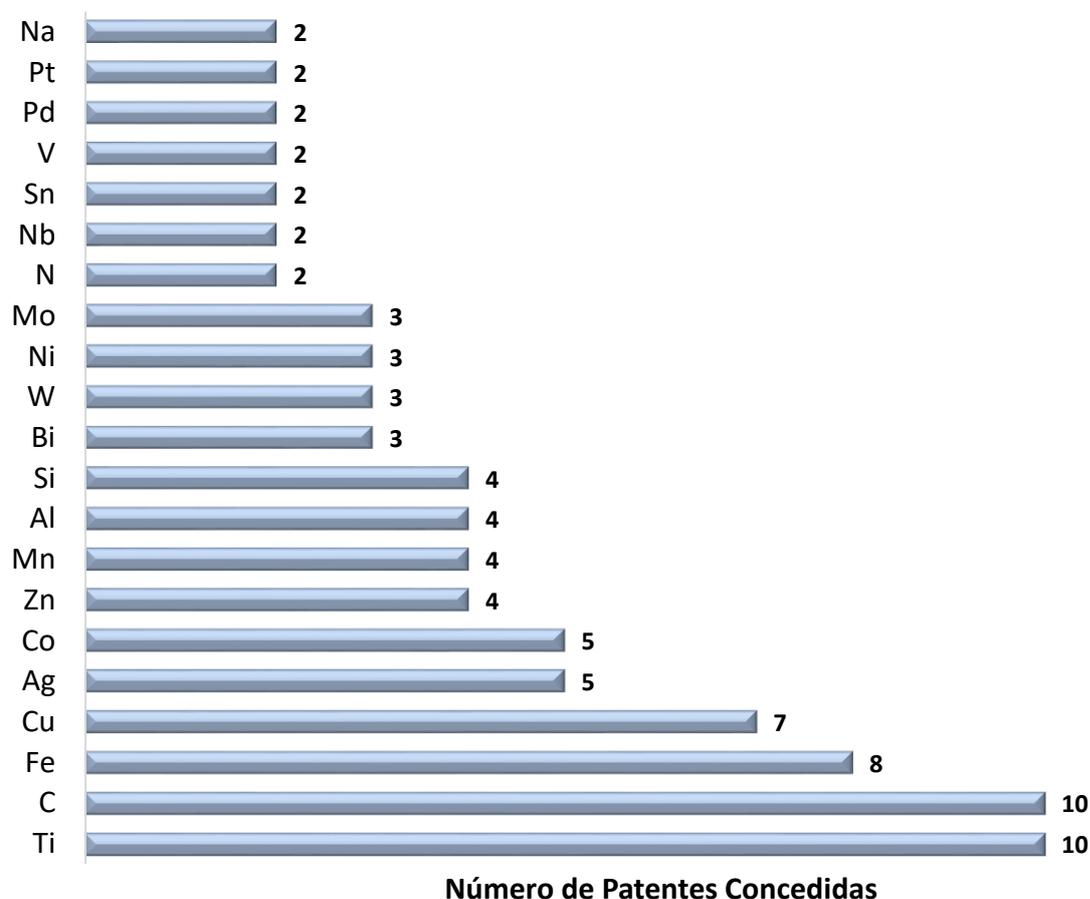


Fonte: A autora, 2022.

Assim como observado nos artigos, a classe mineral é a principal fonte dos elementos constituintes dos NMs desenvolvidos e também é justificado pela expressividade na produção dos catalisadores e adsorventes pelas patentes concedidas, funções realizadas, principalmente, por substâncias de composição metálica e carbonácea.

Dessa forma, obtendo um maior detalhamento dessa classe de matérias-primas, pôde ser identificado os elementos químicos presentes na composição dos NMs desenvolvidos (Figura 58). Sinaliza-se que a composição dos NMs pode abranger mais de uma espécie, seja pela presença dessas espécies compondo a mesma ou diferentes substâncias químicas, e que está sendo verificada essencialmente as espécies inorgânicas contituíntes.

Figura 58 - Elementos químicos que compõem os NMs que aparecem em pelo menos 2 patentes concedidas.



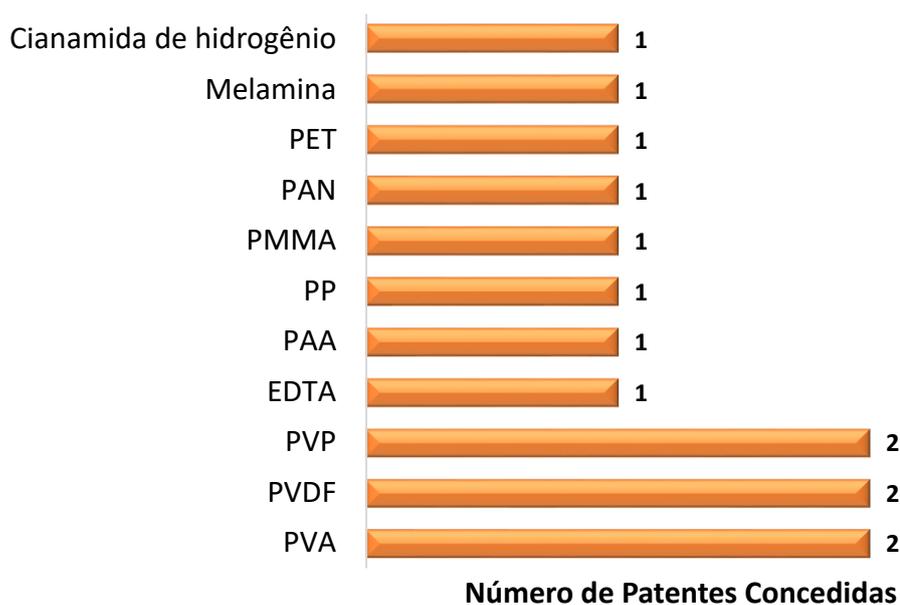
Fonte: A autora, 2022.

O destaque continua sendo para o titânio, que possui a maior menção dentre os metais utilizados, juntamente com o carbono (não metal), seguido do ferro, cobre, prata e cobalto. Nota-se que a utilização do metal titânio ocorre sob a forma do dióxido de titânio (TiO_2) exclusivamente. Cabe comentar que a presença do carbono se deve ao fato da presença dos seus alótropos sintéticos ou naturais (grafeno, nanotubos), pontos quânticos, nitretos, nanofibras e compósitos.

Voltando as outras classes de matérias-primas, nota-se que em segundo lugar está a classe sintética, com uma representatividade de 41% das patentes concedidas analisadas. A aplicação dessas substâncias teve como objetivo desempenhar a função de suporte/imobilização das NPs principalmente, seja de forma direta, através da formação de fibras, folhas, membranas; ou indireta, pelo uso como substância precursora do suporte (exemplo, resíduos de para-choque de carro, polipropileno (PP), que é utilizado para a obtenção do óxido de grafeno reduzido

(rGO) e pontos de carbono (CDs)), que pode também proporcionar produtos finais com as funções adsorvente e filtrante. Além disso, essas espécies químicas podem atuar como agentes estabilizantes, de modificação e de funcionalização. Os principais tipos de materiais sintéticos utilizados podem ser verificados a seguir (Figura 59).

Figura 59 - Materiais sintéticos utilizados na obtenção dos NMs que aparecem patentes concedidas.



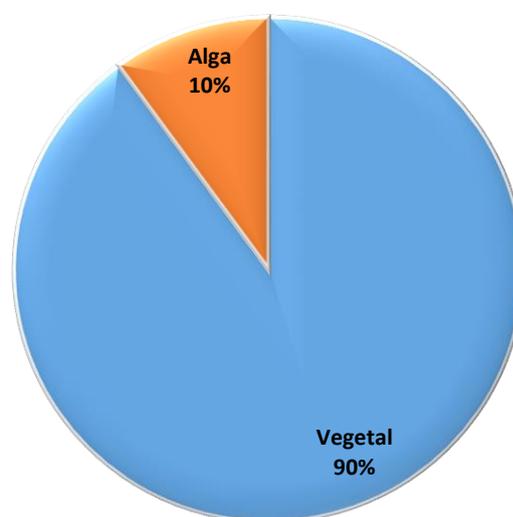
Fonte: A autora, 2022.

Com relação à classe biológica, que ocupa a terceira posição com 33% das patentes concedidas mencionado o seu uso, é interessante perceber que essa representatividade é levemente mais expressiva do que nos artigos (30%), demonstrando que a seleção e aplicação de insumos ambientalmente amigáveis possui interesse e viabilidade técnica para uma aplicação em maior escala. A aplicação dessa classe de materiais nas patentes analisadas objetiva, principalmente, a função de suportação/imobilização dos catalisadores (gel, fibras vegetais, membranas biopoliméricas), que pode também proporcionar produtos finais com as funções adsorvente e filtrante. Além disso, podem ser usadas como agentes oxidante ou redutores (extrato de vegetais) e como agentes estabilizantes, de modificação e de funcionalização (extratos vegetais, celulose monocristalina, ácido mirístico/ácido esteárico/ácido palmítico de origem vegetal). Válido comentar que escolhas como essas trazem contribuições relevantes para

o segmento de produção dos nanocatalisadores, não só pela garantia de um desenvolvimento industrial sustentável, mas também em termos econômicos, dado que são materiais relativamente de baixo custo.

Obtendo um detalhe maior dessa classe, é possível identificar de qual origem biológica tratam-se esses materiais relatados (Figura 60). A predominância é da origem vegetal, representando 90% da classe biológica, seguido da alga.

Figura 60 - Porcentagem das patentes concedidas que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Biológica.



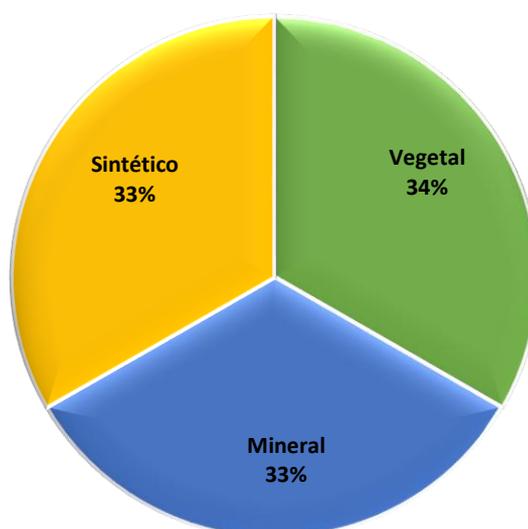
Fonte: A autora, 2022.

Da única patente que abrange a alga, é relatado o desenvolvimento de microgéis de agarose carregado com nanopartículas de cobre (Cu-AG-MGL), pertencente a universidade saudita King Abdulaziz University (2020), cessionário que mais se destaca por possuir o maior número de patentes concedidas selecionadas para o estudo.

Já a análise da classe das matérias-primas de fontes residuais permitiu identificar que sua expressividade mais que dobrou (22%) quando comparada com a representatividade obtida nos artigos (10%). De fato, a aplicação de resíduos merece notoriedade, pois intenções reais desse uso trazem benefícios consideráveis, não só ambientais, mas também sob aspecto econômico, reduzindo os custos na obtenção dos NMs e tornando-os mais acessíveis. As patentes concedidas desse conjunto possuem maior ocorrência no ano de 2020, demonstrando que escolhas como essas passaram a ter mais força recentemente.

Subdividindo a classe de resíduos, é possível ter uma análise com relação ao tipo de origem do material envolvido. Assim, verifica-se que as origens dos resíduos são igualmente significativas nas patentes analisadas, sendo elas de origem vegetal, mineral e sintético (Figura 61).

Figura 61 - Porcentagem das patentes concedidas que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Resíduo.



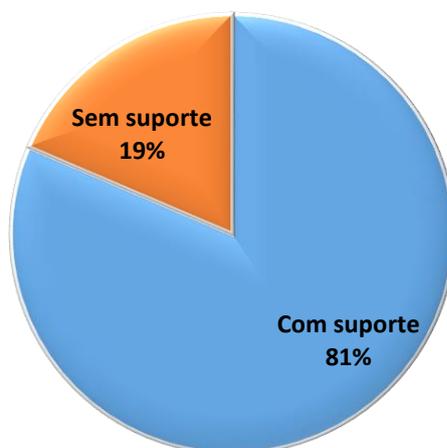
Fonte: A autora, 2022.

Das duas patentes que abordaram os resíduos minerais, uma foi feita pela Universidade Federal De Minas Gerais (2013), que utiliza fontes alternativas de manganês, preferencialmente efluentes de drenagem ácida de mina, águas subterrâneas, águas de captação superficiais, lixívias de minerais, rejeitos ou resíduos, para a produção dos nanocompósitos (Mn₃O₄/maghemita); e a outra elaborada pela universidade saudita King Abdulaziz University (2020), que utiliza cinza volante, resíduo produzido pela queima de combustível nas centrais termoelétricas a carvão, para a síntese de nanotubos de carbono (CNTs) ativados por plasma e elaboração de nanofibras (PMMA/PVDF/Ag/CNTs). Para as duas patentes que abordaram os resíduos sintéticos, ambas foram desenvolvidas pela universidade saudita Imam Abdulrahman Bin Faisal University (2020), que relatam o uso de resíduos de garrafas PET e para-choque de carro (PP) para produzir materiais à base de carbono (carbono mesoporoso 3D, pontos de carbono (CDs) e óxido de grafeno reduzido (rGO)) e preparar nanocompósitos (ZnO-carbono

mesoporosos 3D e TiO_2 -CD- rGO). Já as duas patentes que mencionaram os resíduos de origem vegetal, uma relata o uso de resíduos da agricultura como palha de arroz e serragem, que em associação com feldspatos (minerais constituídos de aluminossilicatos de potássio, sódio e cálcio), atuam como material carreador de nanopartículas de TiO_2 ; e a outra que relata o uso de resíduos agroindustriais, como alho, como fonte de enxofre (S) para dopagem, juntamente com uma fonte de prata (AgNO_3), de nanopartículas de TiO_2 (TiO_2 co-dopadas com Ag e S), elaboradas por Yasser Abdul Motalib (Egito) e Varma Rajender S. (EUA) respectivamente.

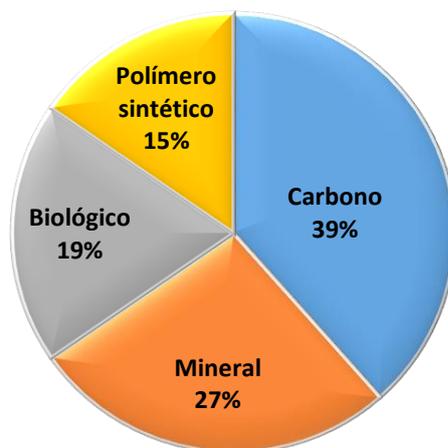
A última subdivisão realizada para as matérias-primas permite analisar a presença de materiais que desempenham a função de suporte ou de imobilização para os catalisadores desenvolvidos (Figura 62 e 63).

Figura 62 - Porcentagem das patentes concedidas que abordam a presença de suportes catalíticos.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 63 - Tipos mais comuns de materiais que desempenham a função de suporte catalítico utilizados nas patentes concedidas.



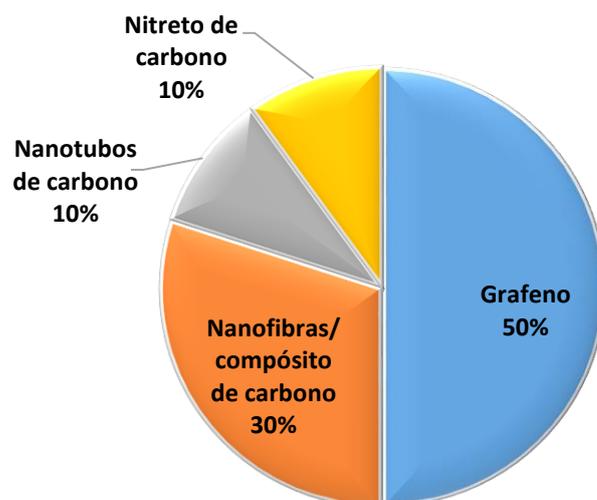
Fonte: A autora, 2022.

Observa-se que a presença de suportes catalíticos é predominante nas patentes concedidas selecionadas para o estudo, inclusive mais expressiva do que nos artigos (60%), confirmando a propensão que existe no desenvolvimento dos novos nanocatalisadores. Os ganhos adquiridos com a imobilização dos NMs catalíticos são reais, com benefícios de desempenho e de recuperabilidade associados à técnica de tratamento do efluente.

O tipo de material que desempenha a função de suporte de maior destaque nas patentes selecionadas é o carbonáceo (39%), seguido do mineral, biológico e polímero sintético. As posições de destaque e as representatividades são bem diferentes das observadas nos artigos. Interessante observar que materiais biológicos possuem maior representatividade de utilização do que os polímeros sintéticos, o que traz vantagens de biocompatibilidade e biodegradabilidade para os NMs desenvolvidos.

Dessa forma, visto a maior relevância dos materiais carbonáceos e a notoriedade que o carbono apresentou na análise dos principais elementos constituintes dos NMs anteriormente, foi feita uma subdivisão para um melhor entendimento e identificação dessas estruturas (Figura 64).

Figura 64 – Tipos de suportes catalíticos carbonáceos utilizados nas patentes concedidas.



Fonte: A autora, 2022.

Observa-se o predomínio na utilização do grafeno, seguido de nanofibras/compostos de carbono, nanotubos de carbono (CNTs) e nitreto de carbono grafítico (g-C₃N₄). Vale ressaltar que nenhuma das patentes concedidas abordou a utilização do carvão vegetal.

Ocupando a segunda posição de destaque, tem-se os materiais de origem mineral com uma representatividade de 30% nas patentes concedidas analisadas. Dessa classe, constata-se a presença da alumina (Al₂O₃), sílica (SiO₂), magnetita (Fe₃O₄) ou maghemita (Fe₂O₃), zeólitas (aluminossilicatos hidratados), feldspatos (aluminossilicatos de potássio, sódio e cálcio), argilas de haloisita (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O ou Al₂O₃.2SiO₂.4H₂O) e atapulgita ((MgAl)₂Si₄O₁₀(OH).4H₂O), além de espécies metálicas constituintes do NM estruturadas sob a forma de lâminas que acabam por desempenhar a função de suporte.

Já na terceira posição, com uma representatividade de 18%, tem-se a presença de materiais biológicos na composição das estruturas de suporte e imobilização dos NMs. A fim de elucidar os materiais utilizados, nota-se a presença da celulose, agarose, palha de arroz, serragem e fibras de fiquê.

Com relação aos materiais sintéticos, que ocupam a última posição com 15%, as substância de maior destaque já foram mencionadas anteriormente no detalhamento das matérias-primas de origem sintética.

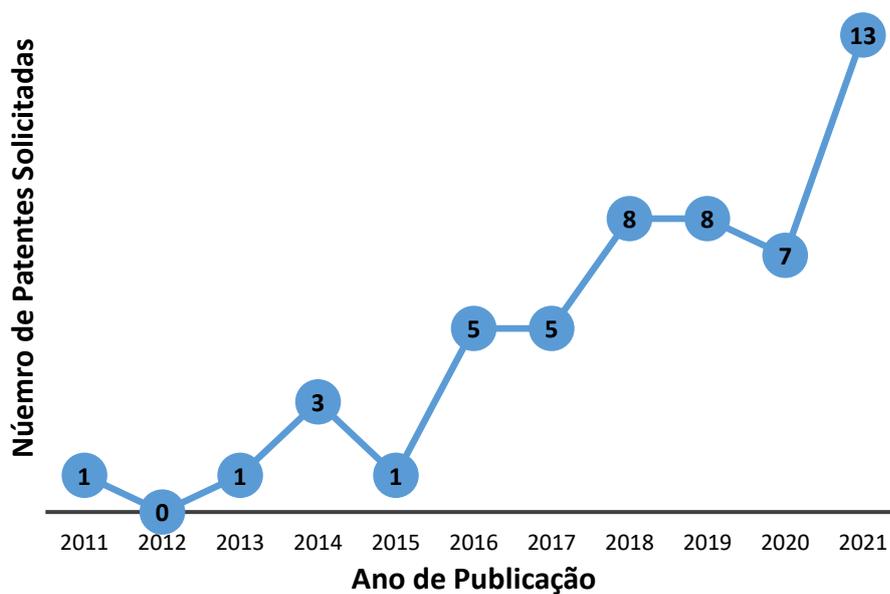
4.1.3 Prospecção tecnológica – patentes solicitadas

4.1.3.1 Análise macro

Para a análise das patentes solicitadas foram utilizados os 52 documentos relevantes encontrados (Apêndice C).

A série histórica abrangeu o período de onze anos, com as datas de publicação das patentes relevantes variando de 2011 a 2021. O maior volume de patentes por ano atualmente se encontra no ano de 2021, com um total de 13 patentes solicitadas (Figura 65).

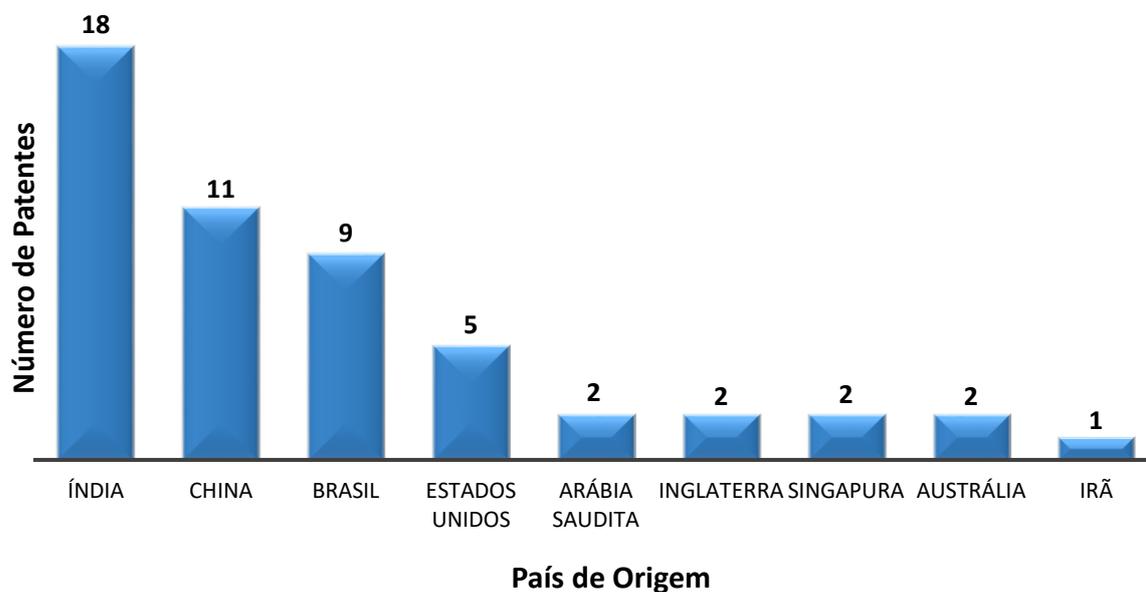
Figura 65 - Série histórica das patentes solicitadas.



Fonte: A autora, 2022.

Com relação à distribuição de patentes solicitadas por país de origem, a Índia lidera com 18, seguida da China com 11, do Brasil com 9 e dos EUA com 5 patentes (Figura 66), sendo esses os países de maior destaque e contribuição para o tema em estudo. A posição ocupada pelo Brasil, o terceiro lugar, só possível de ser identificada através de documentos inseridos na base do INPI.

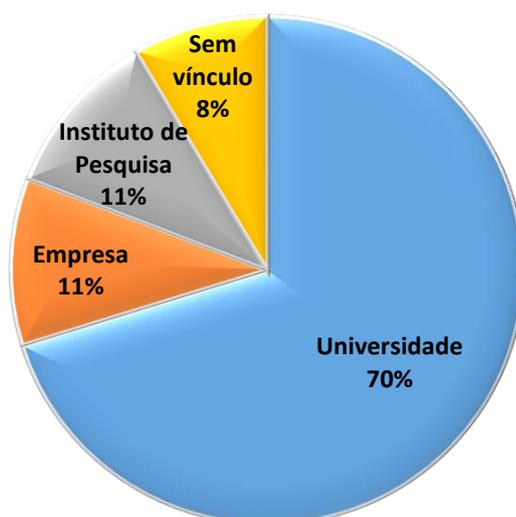
Figura 66 – Patentes solicitadas separadas por país de origem.



Fonte: A autora, 2022.

Das instituições cessionárias, ou seja, que detém a tecnologia das patentes, foram encontradas 33 universidades, 5 institutos de pesquisa, 5 empresas e 4 sem vínculo (Figura 67). Este resultado mostra que o domínio da tecnologia de fabricação dos NMs destinados ao tratamento terciário de águas residuais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos é de interesse das universidades predominantemente, seguido dos institutos de pesquisas e das empresas, que se encontram com a mesma representatividade. E por último, tem-se a aparição de cessionários que não apresentam vínculos declarados com alguma instituição. Assim, nota-se que o tema ainda desperta menor interesse por parte dos institutos de pesquisa e das empresas.

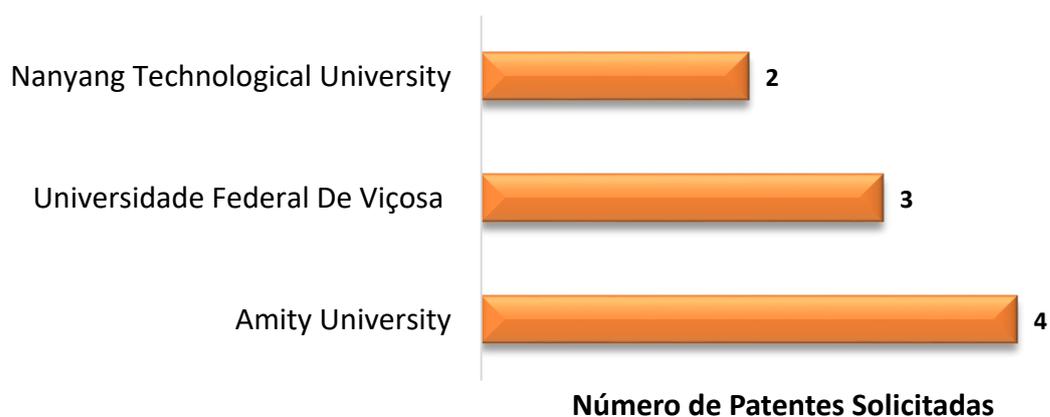
Figura 67 - Patentes solicitadas separadas por tipo de instituição de origem.



Fonte: A autora, 2022.

A Amity University (Índia) aparece como a universidade detentora do maior número de patentes no período de análise, seguida pela Universidade Federal de Viçosa (Brasil) e pela Nanyang Technological University (Singapura) (Figura 68).

Figura 68 - Patentes solicitadas separadas por cessionários que tiveram mais do que uma patente solicitada.



Fonte: A autora, 2022.

4.1.3.2 Análise meso

Posteriormente a definição das taxonomias (as mesmas utilizadas para os artigos), foi feita a análise das tendências das 52 patentes relevantes selecionadas. Observa-se, como na análise dos artigos científicos e patentes concedidas, que os estudos desenvolvidos nas patentes solicitadas abrangem completamente as taxonomias consideradas para metodologias de obtenção dos NMs com relação aos tipos de matérias-primas, aplicação do NM no produto final destinado ao tratamento terciário de águas residuais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos e avaliação das suas características (Figura 69).

Figura 69 - Patentes solicitadas separadas pelas taxonomias.

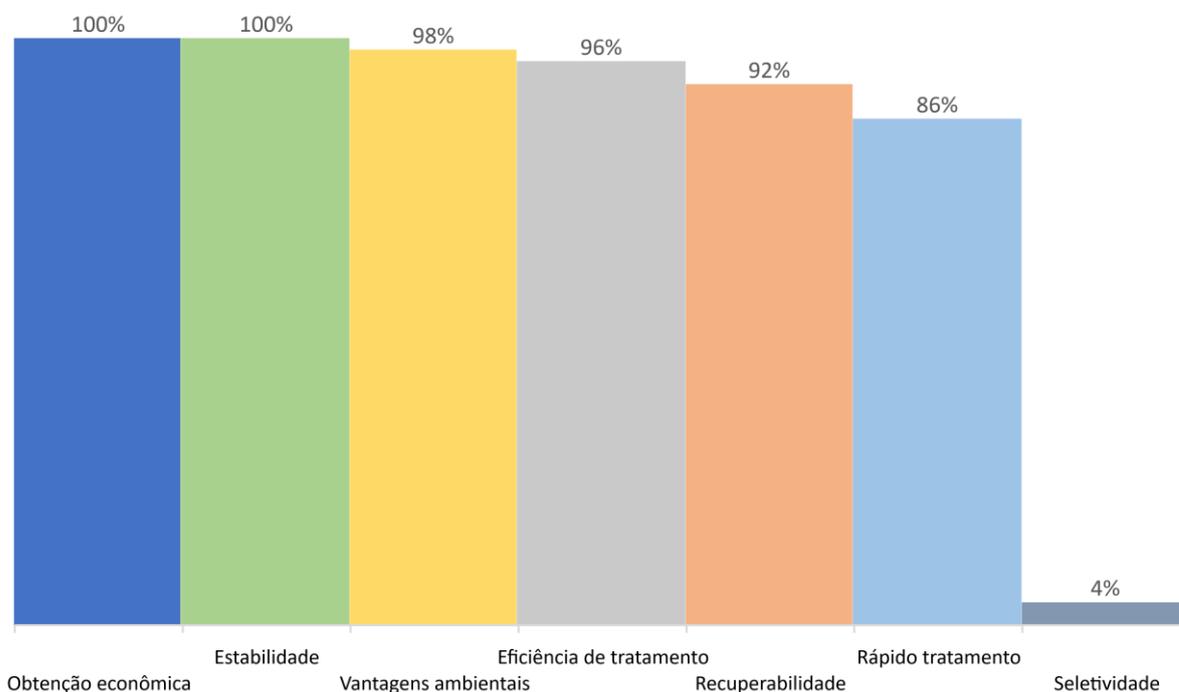


Fonte: A autora, 2022.

4.1.3.3 Análise micro

A “Característica do produto final” foi um dos temas abordados entre as patentes (Figura 70). O foco nas características de obtenção econômica e estabilidade é unanimidade entre as patentes solicitadas, representando o interesse no desenvolvimento de rotas de síntese dos NMs de baixo custo, simplicidade e que, junto com a escolha das substâncias utilizadas, proporcionam a preservação das propriedades do material para sua maior durabilidade.

Figura 70 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordaram cada uma das sete classes da “Característica do produto final”.



Fonte: A autora, 2022.

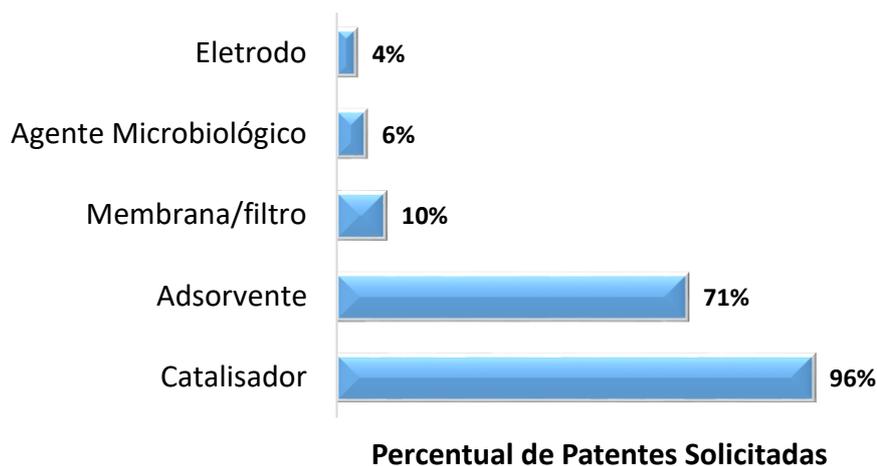
Com mais de 90% de abordagem, tem-se as características de vantagens ambientais, eficiência de tratamento e recuperabilidade, demonstrando a busca por produtos e técnicas de tratamento que sejam *eco-friendly*, capazes de garantir adequada remoção dos contaminantes e possíveis de serem recuperados/reutilizados.

A respeito da característica de rápido tratamento, apesar de ser um fator interessante para o mercado, é observado uma menor representatividade, mas ainda sendo garantida pela grande maioria dos desenvolvimentos. Em relação à seletividade (4%), que nas patentes concedidas não houve nenhuma ocorrência, tem-se o seu aparecimento em apenas dois documentos patentários solicitados, publicados nos anos de 2013 e 2017, o que realmente demonstra uma baixa relevância e a não priorização de sua garantia, mas o que não descarta a possibilidade de ser algo presente nos desenvolvimentos futuros, visto que nos artigos essa representatividade é quase o dobro (7%).

A segunda taxonomia é de aplicação como “Produto final” e sua análise estabelecida foi sob o aspecto das funções específicas desempenhas pelo NM projetado para aplicação nas

técnicas de tratamento de efluentes aquosos. Assim, é possível observar quais são as funções mais obtidas nos estudos (Figura 71).

Figura 71 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordaram cada um dos cinco tipos de funções do “Produto final”.

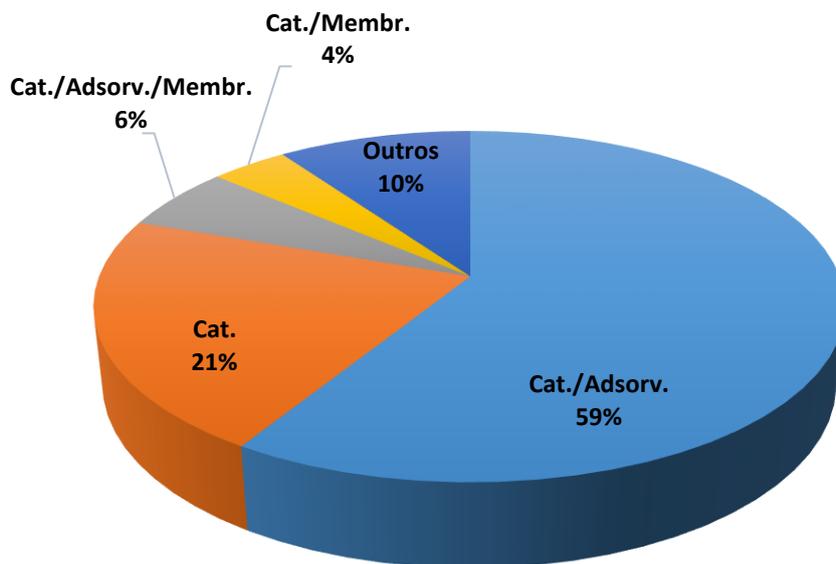


Fonte: A autora, 2022.

Verifica-se que foco principal também é no desenvolvimento de NM com a função catalisador, abrangendo quase que totalidade dos documentos, com a segunda maior representatividade sendo adsorvente (71%), seguido pela membrana/filtro, agente microbiológico e eletrodo. Dessa forma, o produto final desenvolvido pode assumir uma ou múltiplas funções, devido ao fato da existência de uma estrutura única multifuncional e/ou diferentes estruturas desempenhando as funções relatadas. A maioria dos desenvolvimentos relatados confecciona produtos que apresentam na mesma estrutura variadas funções, proporcionando a existência de efeitos sinérgicos dos diferentes processos de tratamento (catalítico, adsorção, filtração, biológico e eletroquímico).

Levando em consideração essa possibilidade de ação simultânea das funções que o produto final pode assumir, seja pela presença de um ou mais materiais, foi analisado as combinações estabelecidas a fim de apurar como elas estão distribuídas pelas patentes solicitadas selecionadas (Figura 72).

Figura 72 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordaram as diferentes combinações de funções no “Produto final”.

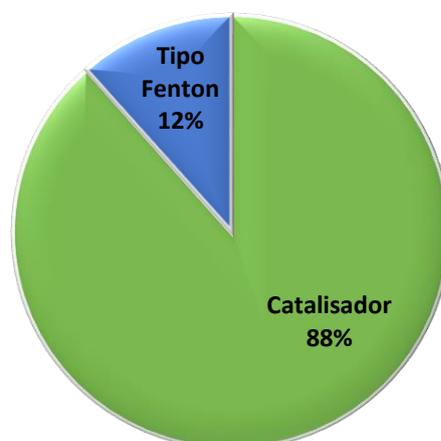


Fonte: A autora, 2022.

Constata-se que a combinação catalisador/adsorvente é o produto que mais se destaca nos documentos analisados, seguido pelo catalisador de forma independente, catalisador/adsorvente/membrana e catalisador/membrana. Já as demais combinações, menos representativas, são contempladas por apenas uma patente cada. Essa notabilidade reafirma o crescente interesse na superação das limitações e dificuldades que as técnicas utilizadas de forma independente possuem, e evidenciam uma tendência de inovação para aplicações no setor de tratamento de efluentes aquosos.

A fim de elucidar a função catalisador no produto final, visto a sua maior representatividade, de maneira que seja possível ter um melhor entendimento dos detalhes do processo catalítico envolvido, é possível avaliar a existência de algum tipo específico de catalisador empregado (Figura 73).

Figura 73- Porcentagem das patentes solicitadas que abrangem os dois tipos de classes de catalisadores.

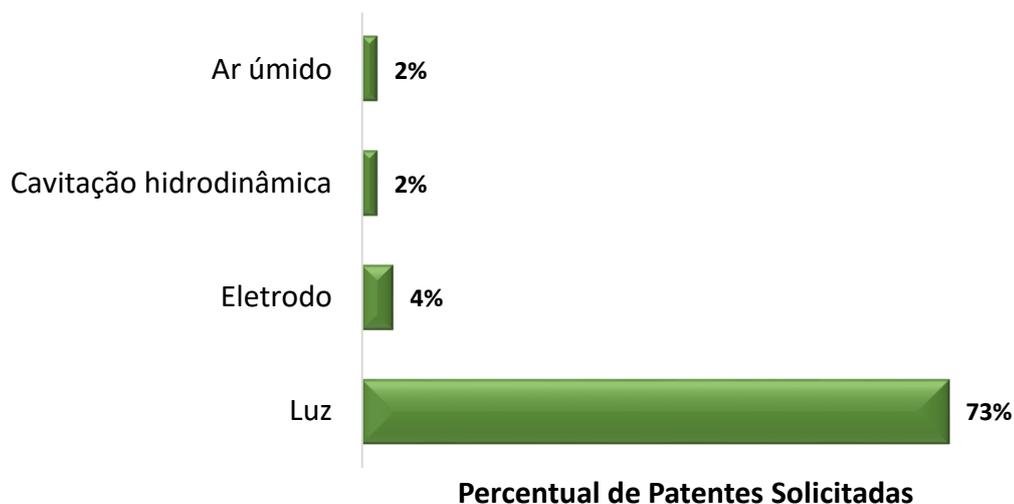


Fonte: A autora, 2022.

Assim como observado nos artigos e patentes concedidas, os catalisadores mencionados de forma genérica, ou seja, sem nenhuma denominação específica, são os de maior representatividade nas patentes solicitadas seccionadas, mas nota-se a menção por catalisadores do tipo Fenton em seis documentos. Dentre esses, três são de produções de universidades chinesas, Changsha University of Science & Technology (2018), Jiangsu University of Technology (2017) e Tianjin Polytechnic University (2016); duas são de universidades americanas, Northeastern University (2021) e Louisiana State University (2019); e um da universidade australiana Monash University (2016).

Uma outra análise interessante foi a identificação da existência de dispositivos combinados ao tratamento, a fim de garantir a degradação do corante orgânico sintético (Figura 74).

Figura 74 - Porcentagem das patentes solicitadas que empregam a associação de dispositivos e/ou aditivos ao tratamento.

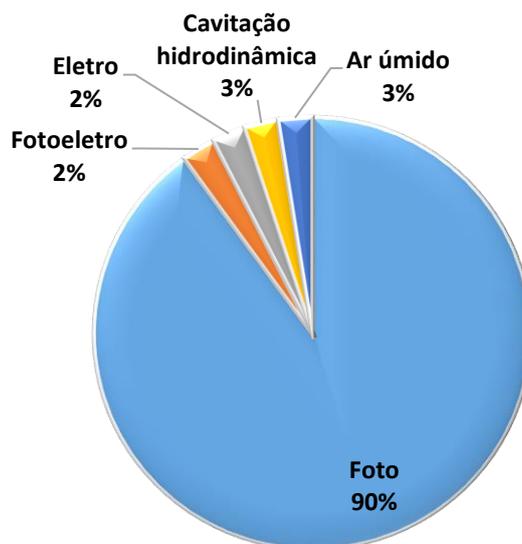


Fonte: A autora, 2022.

Observa-se o elevado interesse das patentes pelos processos assistidos por uma fonte de radiação luminosa (UV-Vis), focando no desenvolvimento de fotocatalisadores, visto o maior volume de documentos que os mencionam (73%). Na sequência, tem-se os processos que utilizam eletrodos (oxidação/redução eletroquímica), cavitação hidrodinâmica (CH) e ar úmido (oxidação de ar úmido catalítico (CWAO)). Diferentemente dos artigos e patentes concedidas, não é notado o uso de ultra-som, micro-ondas, plasma ou ozônio.

Dentre as 40 patentes solicitadas que mencionam esses tipos de dispositivos e/ou aditivos associados à técnica de tratamento, nota-se que o uso destes ocorreu, predominantemente, de forma independente, ou seja, sem a aplicação de forma associada (Figura 75).

Figura 75 - Distribuição das diferentes formas de utilização dos dispositivos/aditivos nos processos de tratamento.



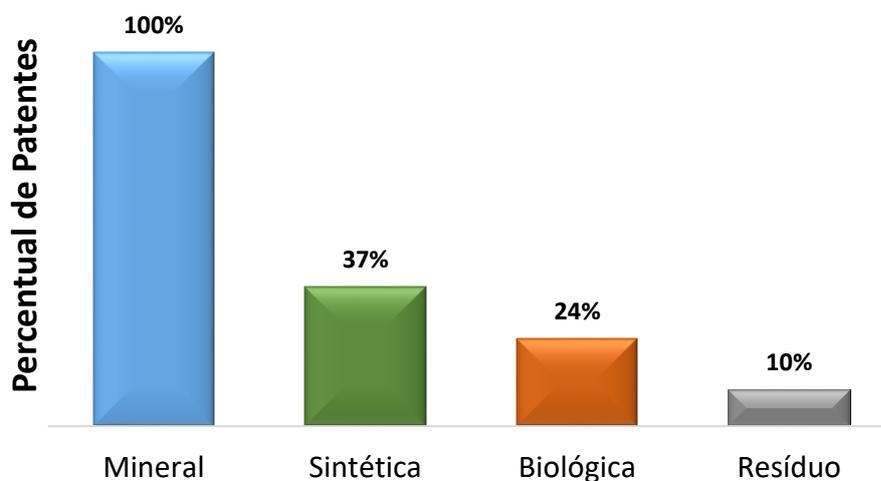
Fonte: A autora, 2022.

A associação de luz e eletrodo foi mencionada por uma única patente, desenvolvida pela empresa britânica Keronite International Limited (2013), que aborda o desenvolvimento de uma célula de combustível microbiano (CCM) para o tratamento de água. Esse dispositivo bio-fotoeletroquímico compreende um fotocatalisador (TiO_2) e uma fonte de luz UV para um tratamento inicial (oxidação avançada); e microrganismos (biofilme) associados com o ânodo e um catalisador associado com o cátodo para um tratamento secundário (oxidação microbiana).

Assim como sinalizado nas análises anteriores, artigos e patentes concedidas, não está excluída a possibilidade de também ter a adição de agentes oxidantes ou redutores convencionais para ativação no meio reacional, exemplos do H_2O_2 (peróxido de hidrogênio) e do NaBH_4 (borohidreto de sódio) comumente utilizados.

A última taxonomia a ser analisada é o “Matéria-prima do NM”, dividido e explorado em relação aos insumos empregados na fabricação do NM. A matéria-prima predominante e presente em todas as patentes é a mineral, seguido da sintética, biológica e resíduo (Figura 76).

Figura 76 – Porcentagem das patentes solicitadas que abordam as diferentes classes da “Matéria-prima do NM”.

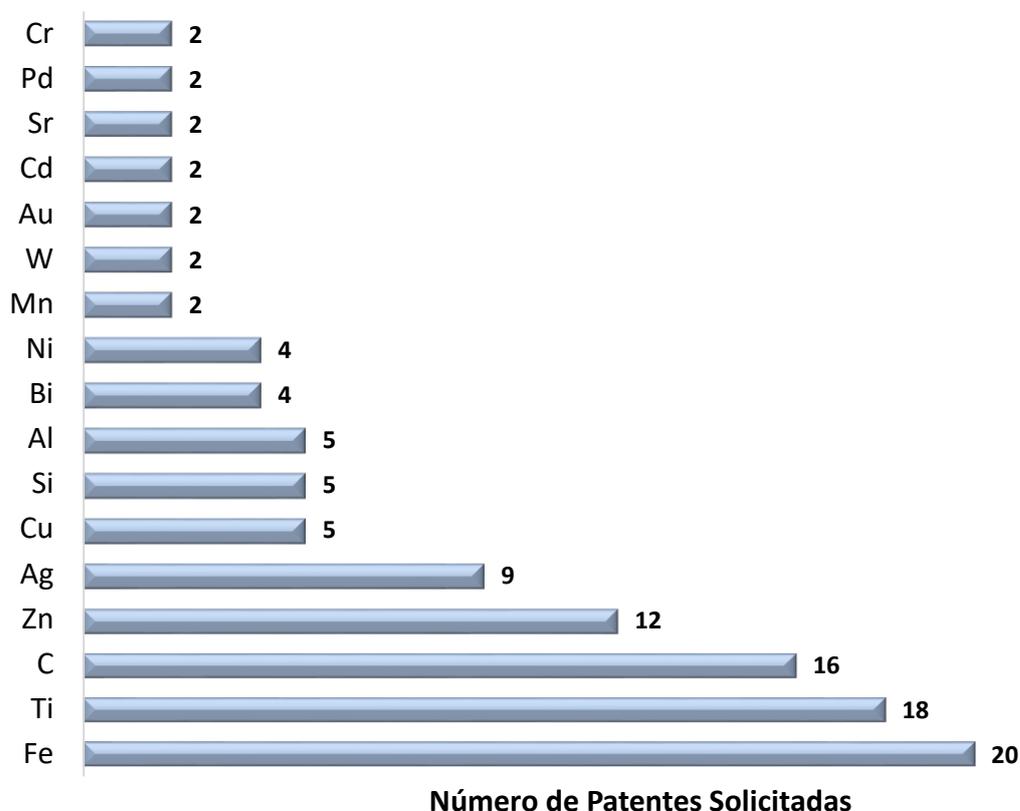


Fonte: A autora, 2022.

A classe mineral continua sendo a principal fonte dos elementos constituintes dos NMs desenvolvidos, também justificado pelo fato da expressividade na produção dos catalisadores e adsorventes pelas patentes solicitadas, funções desempenhadas, principalmente, por substâncias compostas por espécies metálicas e carbonáceas obtidas a partir minerais.

Assim, obtendo um maior detalhamento dessa classe de matérias-primas, pôde ser identificado os elementos químicos que estão presentes na estrutura final do NM obtido (Figura 77). Reforça-se que a composição dos NMs pode abranger mais de uma espécie, seja pela presença dessas espécies compondo a mesma ou diferentes substâncias químicas, e que está sendo verificada essencialmente as espécies inorgânicas contituíntes.

Figura 77 - Elementos químicos que compõem os NMs que aparecem em pelo menos 2 patentes solicitadas.



Fonte: A autora, 2022.

O destaque passa a ser para o ferro, que possui a maior menção dentre os metais utilizados, seguido do titânio, carbono, zinco e prata. A utilização do ferro ocorre sob a forma de seus óxidos (Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , FeOOH), zero-valente (nFeZ), ferritas de outros metais (exemplo, CuFe_2O_4 e CoFe_2O_4) e oxicloretos (FeOCl). Cabe comentar que a presença do carbono, um não metal, é devido ao fato da presença dos seus alótropos sintéticos ou naturais (grafeno, nanotubos, grafite), pontos quânticos e nitretos.

Voltando as outras classes de matérias-primas, nota-se que em segundo lugar está a classe sintética e a análise desse conjunto permite observar que a função desempenhada por esses materiais é, principalmente, como suporte/imobilização das nanopartículas, formando estruturas como membranas, fibras, folhas, hidrogel, filme, que pode também contribuir para produtos finais com as funções adsorvente e filtrante. Além disso, pode exercer funções como agentes estabilizantes, de modificação e de funcionalização, ou mesmo como solvente. Os principais tipos de materiais sintéticos utilizados podem ser verificados a seguir (Figura 78).

Figura 78 - Materiais sintéticos utilizados na obtenção dos NMs que aparecem em pelo menos 2 patentes solicitadas.

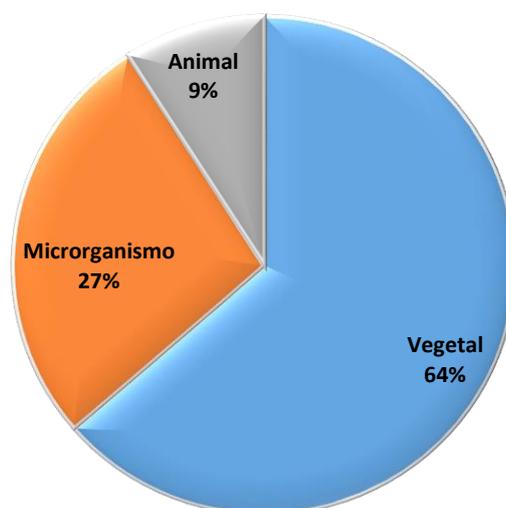


Fonte: A autora, 2022.

Com relação à classe biológica, que aparece em terceiro lugar, observa-se que essa ocorrência nas patentes solicitadas é inferior aos artigos (30%) e patentes concedidas (33%). Mas a existência de tecnologias que optem pela utilização de materiais biológicos, mesmo que ainda em pequena quantidade, mostra os efeitos que a conscientização ambiental está promovendo em prol da preservação e respeito ao meio ambiente. A aplicação dessa classe de materiais nas patentes analisadas objetiva, principalmente, a função de substratos para a imobilização dos catalisadores (carvão e fibras vegetais), que pode também contribuir para produtos finais com a função adsorvente. Além disso, podem ser usadas como agentes oxidante ou redutores (extrato de vegetais) para obtenção das NPs, como agentes estabilizantes, de modificação e de funcionalização, bem como biocatalizadores (enzimas) e agente microbiológico.

Obtendo um detalhe maior dessa classe, é possível identificar de qual origem biológica tratam-se esses materiais relatados (Figura 79). A predominância é da origem vegetal, representando 64% da classe biológica, seguido por microrganismo e animal.

Figura 79 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Biológica.



Fonte: A autora, 2022.

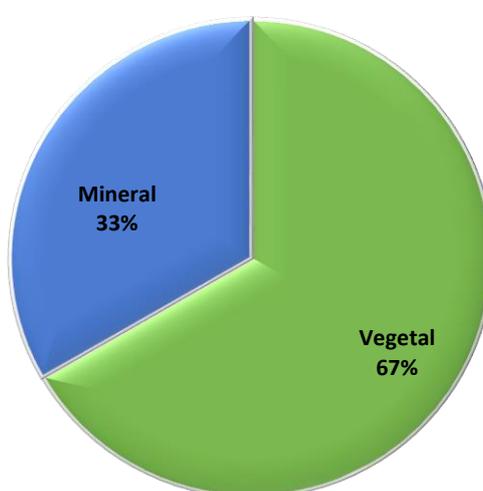
Para a única patente que aborda o uso de material de origem animal, é relatado a produção de nanopartículas bimetálicas de Fe/Ni suportadas em esferas de quitosana, pertencente a Universidade Federal de Viçosa (2019), um dos cessionários que mais se destaca, por possuir o segundo maior número de patentes solicitadas selecionadas para o estudo. Já para as três patentes que descrevem o uso de microrganismos, uma relata a imobilização da enzima lignina peroxidase em nanotubos de carbono, obtidas por extratos fúngicos das espécies *Pleurotus ostreatus* e *Ganoderma lucidum* (cepas PLO9 e GRM117), pertencente a Universidade Federal De Minas Gerais (2015); outra aborda o desenvolvimento de um agente de tratamento de águas residuais nanocompósito de composição diversificada (grafeno, óxido de zinco, poliacrilamida (PAM), dióxido de háfnio, nitrato de cobre, bentonita, diatomita modificada, pó de levedura, pseudomonas halofílicas, algas, nitrobactérias, talos de milho, farelo de aveia, água, casca de toranja e cinza volante ativada), pertencente a empresa chinesa Henan Shuijingtou Cultural Media Co., Ltd. (2017); e a última menciona nanocomposições compreendendo microalgas verdes liofilizadas (*Scenedesmus rubescens*) e nano folhas de óxido de grafeno (GO), pertencente a universidade indiana Amity University (2017).

Já a análise da classe das matérias-primas de fontes residuais permitiu identificar que sua expressividade se equipara à obtida nos artigos científicos (10%). Pela razão de ser um dos maiores desafios da sociedade, a disposição de forma adequada dos resíduos industriais e urbanos, a utilização de resíduo como matéria-prima se torna uma das principais fontes

economicamente viáveis e ecologicamente corretas para o setor de produção de NMs. As patentes solicitadas desse conjunto possuem ocorrências distribuídas de 2016 a 2021.

Subdividindo a classe de resíduos, é possível ter uma análise com relação ao tipo de origem do material envolvido. Assim, verifica-se que a origem dos resíduos é, predominantemente, vegetal, seguido de mineral (Figura 80).

Figura 80 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordam as diferentes origens das matérias-primas da classe Resíduo.

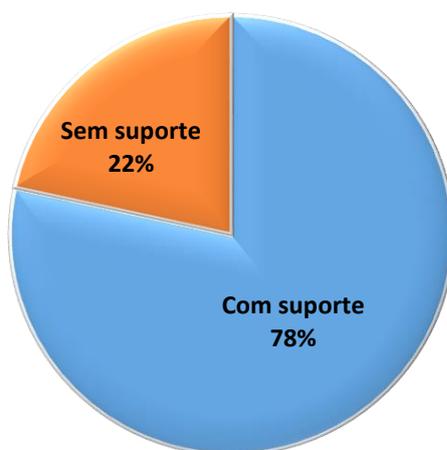


Fonte: A autora, 2022.

Da patente que abordou unicamente resíduos minerais, desenvolvida pela Universidade Federal de Viçosa (2016), é descrito a síntese de nanopartículas polimetálicas a partir de resíduo eletrônico de placas de circuito impresso, compostas por diversos metais como cobre, ferro, zinco, níquel. Das três patentes que relataram o uso exclusivo de resíduos vegetais, duas abordam a obtenção de carvão vegetal para deposição de nanopartículas de óxido de ferro, pertencentes à universidade americana Louisiana State University (2019) e à universidade indiana RK University (2021); e uma menciona o desenvolvimento de uma biofibra (casca da madeira) enxertada com hidrogel híbrido com nanopartícula de CuFe_2O_4 , pertencente à universidade indiana Amity University (2020). Para a patente que aborda a utilização de ambos os tipos de resíduos, vegetal e mineral, pertencente a empresa chinesa Henan Shuijingtou Cultural Media Co., Ltd. (2017), esta já foi detalhada anteriormente na seção que analisou o uso dos microrganismos como materiais biológicos.

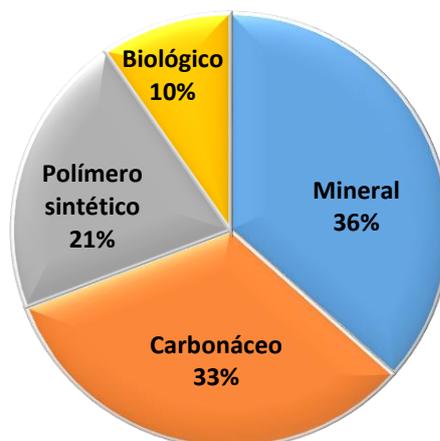
A última subdivisão realizada para as matérias-primas permite analisar a presença de materiais que desempenham a função de suporte ou de imobilização nos NMs desenvolvidos (Figura 81 e 82).

Figura 81 - Porcentagem das patentes solicitadas que abordam a presença de suportes catalíticos.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 82 - Tipos mais comuns de materiais que desempenham a função de suporte catalítico utilizados nas patentes solicitadas.



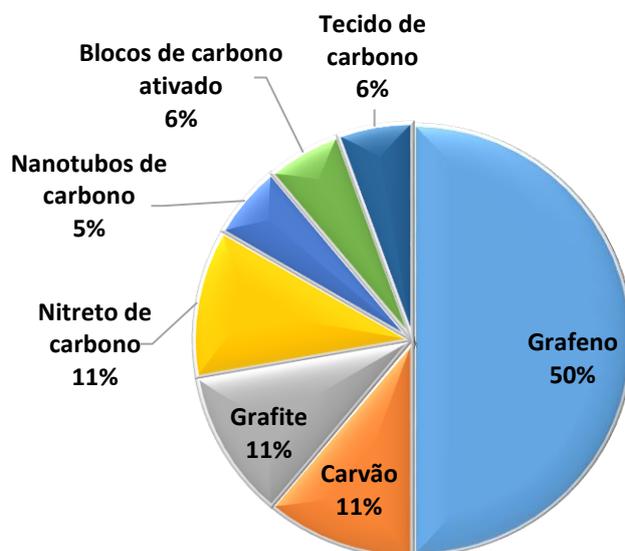
Fonte: A autora, 2022.

Constata-se que a presença de uma suportação nos NMs desenvolvidos é predominante nas patentes solicitadas selecionadas para o estudo, próxima à expressividade das patentes concedidas (81%) e mais expressiva do que nos artigos (60%), mostrando a preferência que existe no desenvolvimento dos novos materiais.

O tipo de material que desempenha a função de suporte de maior destaque nas patentes selecionadas é o mineral (36%), bem próximo ao verificado nos artigos (33%), porém mais expressivo, seguido do carbonáceo, polímero sintético e biológico. A presença de materiais de origem mineral como maior destaque, deve-se ao fato de existirem NMs que possui em um de seus componentes metálicos uma estrutura sob a forma de fibras, tubos, folhas, lâminas, que acabam por desempenhar a função de suporte, além de ser notado a presença da sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), aluminossilicatos argilosos, diatomita, vidro, membrana de aço inox, nitreto de boro hexagonal (hBN), zeólita e cinza volante ativada.

Ocupando a segunda posição de destaque, tem-se os materiais carbonáceos e, devido a notoriedade que o carbono apresentou na análise dos principais elementos constituintes dos NMs anteriormente, foi feita uma subdivisão para um melhor entendimento e identificação dessas estruturas (Figura 83).

Figura 83 – Tipos de suportes catalíticos carbonáceos utilizados nas patentes solicitadas.



Fonte: A autora, 2022.

Observa-se o predomínio na utilização do grafeno, seguido do carvão, grafite e nitreto de carbono grafítico ($g-C_3N_4$) com a mesma representatividade, e por último, nanotubos de carbono (CNTs), blocos de carbono ativado e tecido de carbono equiparados.

Apesar de possuir a menor representatividade, a presença de materiais biológicos nas novas tecnologias de produção dos NMs mostra o propósito de criar produtos mais sustentáveis. Nessa classe, tem-se a presença materiais com a celulose, quitosana, casca de madeira, sacarose (associada ao polímero sintético PVA), talos de milho, farelo de aveia e casca de toranja.

Com relação aos materiais sintéticos, as substância de maior destaque já foram mencionadas anteriormente no detalhamento das matérias-primas de origem sintética.

4.1.4 Conclusões sobre a fase de prospecção tecnológica

Com os resultados da prospecção tecnológica é possível fazer uma análise prévia mais global, conectando as informações encontradas de modo a gerar conhecimento sobre os NMs utilizados nas técnicas de tratamento terciário de águas residuais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos. E é esse conhecimento que foi posteriormente utilizado para a criação do *technology roadmap*.

Percebe-se, por exemplo, que a China ocupa posição de liderança tecnológica no longo prazo e de forma dominante, com uma volumetria expressiva de artigos publicados no período analisado. Já no curto e médio prazo, a posição de liderança tecnológica é ocupada pela Arábia Saudita e Índia, respectivamente, com a presença da China na segunda posição de ambos os prazos.

Levando em consideração os tipos de instituições, nota-se, como era de se esperar, que as universidades são a maioria em termos de patentes e de artigos. A expressividade das universidades é maior nos artigos (85%), apresentando pequenas reduções para as patentes solicitadas (70%) e patentes concedidas (65%). Os institutos ou centros de pesquisa possuem uma porcentagem de participação entre 5 e 17%, e as empresas entre 3 e 11% na produção dos artigos e patentes analisados.

As características do produto final demonstram que os materiais desenvolvidos entregam processos com excelentes performances, seja em relação à eficiência de degradação dos poluentes, quanto ao tempo de duração do processo. Além disso, sob aspectos econômicos e ambientais, tem-se produtos mais acessíveis e com componente de baixa toxicidade. Já com relação a viabilidade de reutilização dos NMs, a possibilidade de recuperação e estabilidade dos materiais é também garantida.

Os produtos finais mais produzidos são catalisadores, adsorventes e membranas sob forma combinada, garantindo o efeito sinérgico dos processos catalíticos, adsorptivos e de filtração, que superam as dificuldades encontradas nas técnicas utilizadas de forma independente e melhoram o desempenho dos materiais. Além disso, constata-se a predominância na utilização de fontes de luz (UV-Vis) como dispositivo adicional a técnica de tratamento.

As matérias-primas mais usadas foram de origem mineral e sintética, mas a presença da origem biológica e residual já pode ser notada tanto nos artigos quanto nas patentes. Com relação às espécies metálicas mais utilizadas para o desenvolvimento dos NMs, tem-se o titânio, ferro, zinco, prata, silício e cobre. Já com relação as espécies não metálicas, o destaque é para a utilização do carbono, sob suas variadas formas de apresentação. Por fim, a presença dos substratos para suportação do NM é observada na maioria dos documentos e a sua constituição é marcada, predominantemente, por substâncias de origem mineral e carbonácea.

4.1.4.1 Situação do Brasil

Segundo o levantamento de dados aqui realizado, o Brasil possuía até o término da etapa de pesquisa deste trabalho (Outubro de 2021) 5 artigos publicados, 2 patentes concedidas e 9 patentes solicitadas, ainda em análise pelo INPI.

Isso demonstra que atores brasileiros já possuem algum interesse pela tecnologia e podem estar se movimentando em direção à aplicação dos NMs no setor de tratamento de águas residuais industriais. As instituições brasileiras encontradas foram: Universidade Federal De Minas Gerais (2013); Marcos Adriano Okamura, Carlyle Antonio Cunha e Carlos Salles Lambert (2015); Universidade Federal De São Carlos (2018); Universidade Federal Do Pampa (2020); Ministério Da Ciência e Tecnologia em parceria com Universidade Federal de Pernambuco (2014); Universidade Federal De Minas Gerais (2015); Instituto de Tecnologia e Pesquisa em parceria com Universidade Tiradentes (2018); Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2018); Universidade Federal de Viçosa (2019 e 2016); Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2015); Universidade Federal de Lavras com a parceria do *Bioproducts Research Unit* (2017); Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2020); Universidade Federal de Itajubá (2020); e Universidade Federal de Santa Catarina com a parceria do Instituto Nacional de Tecnologia (2021).

Com a elaboração do *technology roadmap* no próximo item, é possível visualizar todos os atores e suas expertises, de modo a agregar ainda mais informações relevantes para as tendências atuais que envolvem o tema em estudo.

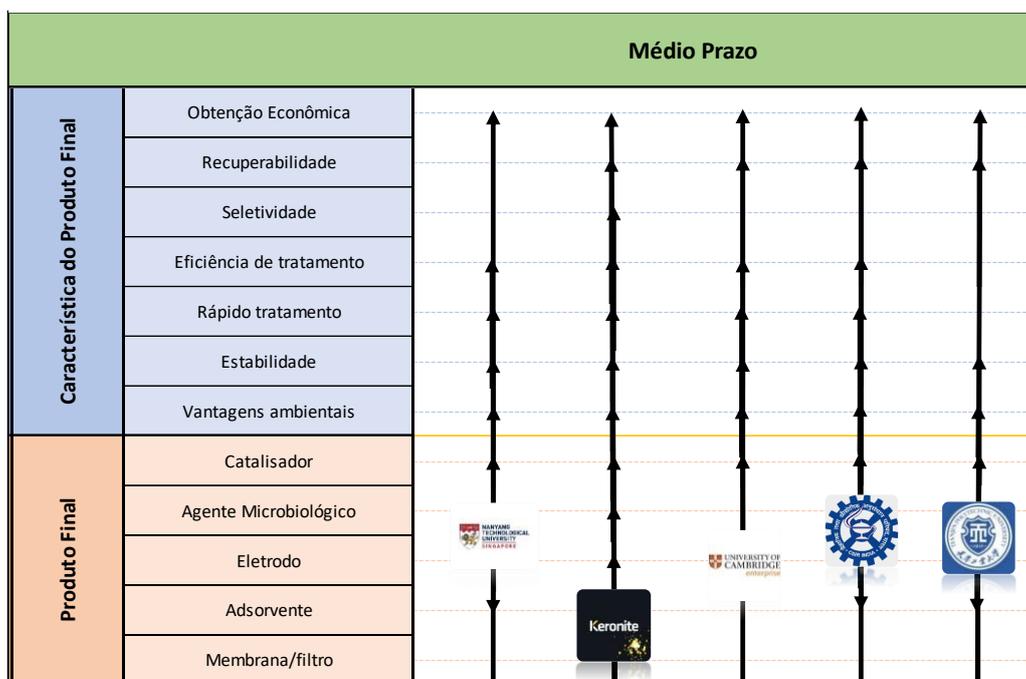
4.2 Fase pós-prospectiva

Seguindo com a metodologia descrita para esse estudo, neste item é abordado a construção do *technology roadmap*, utilizando as informações obtidas no item anterior. É o momento de reorganização da inteligência adquirida pela prospecção tecnológica, dispondo-a sob a forma de um mapa dividido nos eixos horizontal (tempo) e vertical (taxonomias).

As taxonomias finais foram selecionadas de modo a melhor organizar a exposição da informação encontrada em um formato visual de mapa, sendo elas: Características do Produto Final, Produto Final e Matéria-prima do NM. Elas foram arrumadas em caixas na vertical no início do mapa, a partir da onde foram traçadas linhas guias na horizontal, que funcionam como ponto final (interseção) para as setas indicativas que saem dos atores (logomarcas), como

descrito no capítulo de metodologia (Figura 84).

Figura 84 - Exemplo da colocação das linhas guias saindo das caixas de taxonomia e da interseção com as setas que saem dos atores (logomarcas).



Fonte: A autora, 2022.

Para identificar as principais características de interesse do mercado quando se trata de técnicas de tratamento de efluentes, a taxonomia característica do produto final foi subdividida sob os aspectos mais abordados indenticados nos documentos analisados: obtenção econômica, recuperabilidade, seletividade, eficiência de tratamento, rápido tratamento, estabilidade e vantagens ambientais (Figura 85).

Figura 85 - Subdivisões da taxonomia final adotada no *roadmap*: Característica do Produto Final.

Característica do Produto Final	Obtenção Econômica
	Recuperabilidade
	Seletividade
	Eficiência de tratamento
	Rápido tratamento
	Estabilidade
	Vantagens ambientais

Fonte: A autora, 2022.

Com relação às informações sobre a aplicação do NM nas técnicas de tratamento de efluentes aquosos avaliadas, foi subdividida a taxonomia de produtos finais obtidos por cada tipo de função identificada: catalisador, agente microbiológico, eletrodo, adsorvente e membrana/filtro (Figura 86).

Figura 86 - Subdivisões da taxonomia final adotada no *roadmap*: Produto Final.

Produto Final	Catalisador
	Agente Microbiológico
	Eletrodo
	Adsorvente
	Membrana/filtro

Fonte: A autora, 2022.

Em outro agrupamento, foram reunidas as matérias-primas do NM, subdividida em: biológica, mineral, sintética e resíduo (Figura 87).

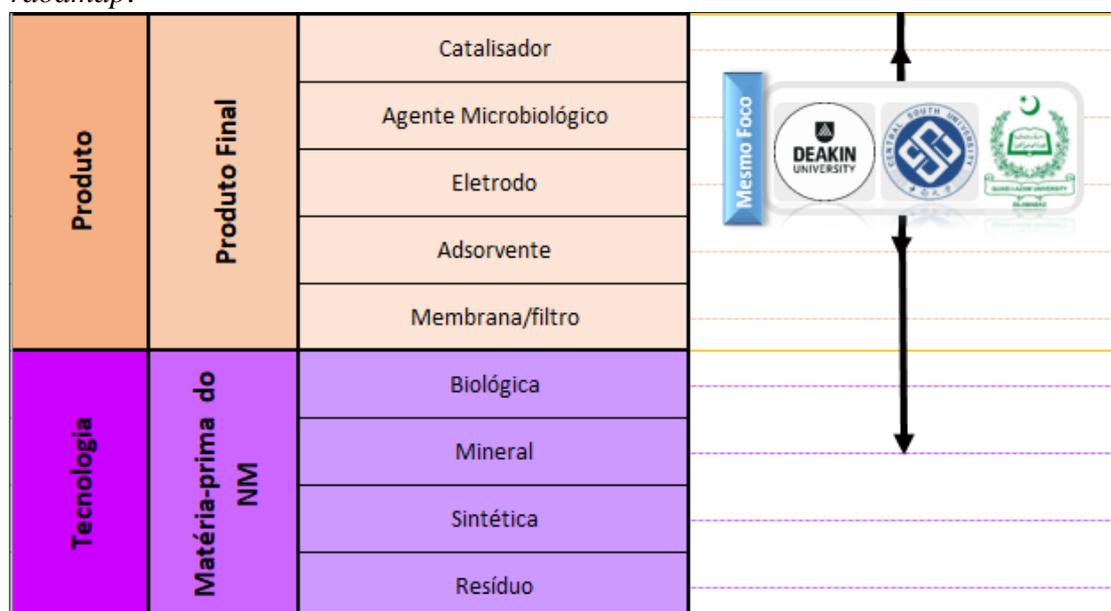
Figura 87 - Subdivisões da taxonomia final adotada no *roadmap*: Matéria-prima do NM.

Matéria-prima do NM	Biológica
	Mineral
	Sintética
	Resíduo

Fonte: A autora, 2022.

A disposição (localização) e ordem específica das logomarcas dos atores dentro de cada espaço temporal (estágio atual, curto, médio e longo prazo) são realizadas de forma a melhor preencher o espaço. O que determina as expertises de cada *player* são as setas indicativas. No entanto, quando dois ou mais atores descrevem exatamente o mesmo perfil de expertises no mapa, estes foram dispostos em um quadrado maior, formando um *cluster* (Figura 88).

Figura 88 - Exemplo de um *cluster*, onde a Deakin University, Central South University e Quaid-i-Azam University estão ligadas às mesmas taxonomias no *roadmap*.



Fonte: A autora, 2022.

Desse modo, os *clusters* não indicam necessariamente universidades, institutos de pesquisa ou empresas que estão trabalhando juntos, apenas sinalizam que estão pesquisando sobre o mesmo assunto. Assim, quando os atores apresentam as mesmas taxonomias, é colocada a indicação “Mesmo Foco”, e caso tenham realmente trabalhado juntos, é colocada a indicação “Parceria” (Figura 89).

Figura 89 - Exemplo de uma parceria, onde a Djillali Liabes University Sidi Bel Abbes e Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) trabalharam juntas no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: A autora, 2022.

Como o quantitativo de atores é muito expressivo, o que geraria um mapa muito extenso e de difícil leitura, optou-se por fazer um mapa segmentado por cortes temporais (horizontais), com as taxonomias repetidas em cada corte para facilitar a sua leitura.

4.2.1 Estágio atual

No corte temporal do *technology roadmap* para o estágio atual, pode-se observar principalmente os atores mundiais envolvidos na produção atual de NMs destinados às aplicações catalíticas para tratamento de água (Figura 90).

Visto que esses NMs destinados às aplicações catalíticas já são produzidos em escala industrial e comercializados pelas empresas destacadas, as informações disponíveis nos portfólios, que descrevem os produtos vendidos, são mais gerais e não permitiram uma análise mais apurada. Por esse motivo, nas taxonomias “Característica do Produto Final” e “Matéria-

prima do NM”, nem todas as subdivisões adotadas puderam ser avaliadas, mas o que não significa que o produto não as possuam. Tratando-se da formação de clusters, *players* que detêm tecnologias de iguais taxonomias, só foi considerado o mesmo foco se inclusive a composição do catalisador for igual.

Como pode ser observado pelo *roadmap*, a matéria-prima mineral pôde ser identificada como a predominante na produção do NM, visto que o principal elemento constituinte e/ou a composição final dos materiais foram, em sua maioria, as únicas informações disponíveis para consulta. A segunda classe de matéria-prima possível de ser identificada foi a sintética, com a utilização feita por apenas um fabricante, que relata a utilização de hidrocarbonetos de alta pureza e baixo peso molecular com o principal insumo para produzir o NM. Dessa forma, com relação aos principais elementos metálicos presentes na composição final dos NMs desenvolvidos, tem-se a presença majoritária do titânio (TiO_2), além do ferro (liga NiFe, Fe e seus óxidos), níquel (liga NiFe e NiCr), cromo (liga NiCr ou isolado), prata (Ag), cobre (Cu), manganês (Mg), silício (SiO_2) e alumínio (Al_2O_3). Já com relação aos elementos não metálicos, tem-se a presença do carbono (CNTs), que merece ser destacado pelas excelentes funções desempenhadas nos sistemas de tratamento de efluentes aquosos.

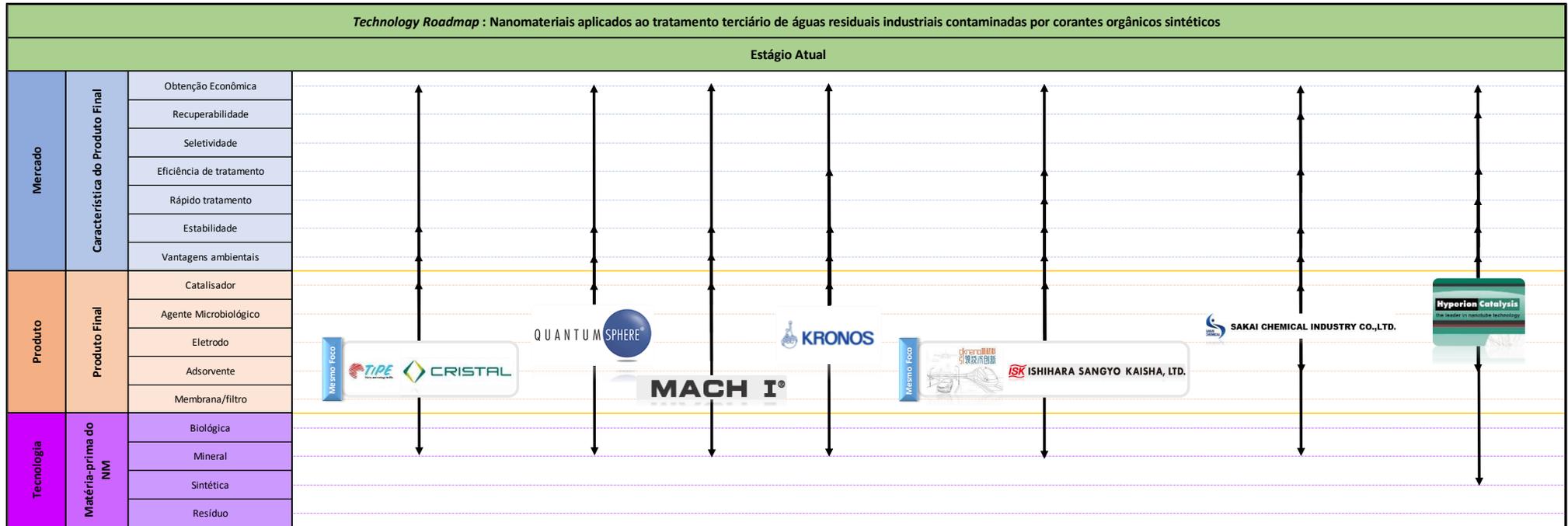
Em termos de produto final e da existência de mais de uma função, o destaque é a Sakai Chemical (Japão), que desenvolve NMs que garantem um sistema de tratamento multifuncional, catalítico e adsortivo, sob a forma de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ou $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. As espécies SiO_2 e Al_2O_3 proporcionam uma suportaçã/imobilizaçã das nanopartículas, garantindo performances mais eficientes e recuperabilidade do material facilitada. As demais empresas estão limitadas a produtos com performances exclusivamente catalíticas, com excessã da empresa Hyperion Catalysis International (EUA), que se destaca na produçã de NMs destinados a suportaçã de catalisadores e com excelentes capacidades adsortivas, os nanotubos de carbono (CNTs).

A TitanPE Technologies (China) e CRISTAL (Arábia Saudita) aparecem em um *cluster*, indicando que detêm desenvolvimentos com tecnologias de mesmas taxonomias. Ambas tratam da produçã de nanopartículas de TiO_2 para aplicações fotocatalíticas. Assim, a respeito dessa substância, TiO_2 , as características marcantes e comumente destacadas pelos produtores e pesquisadores é a obtençã econômica, por serem oriundos de matérias-primas baratas, além de possuírem boa estabilidade e vantagens ambientais devido sua não toxicidade. Vale ressaltar que a TitanPE Technologies é a fabricante líder de nano fotocatalisadores na China e a

CRISTAL é a segunda maior produtora mundial de dióxido de titânio (TiO_2) e líder na produção de produtos químicos de titânio.

O cluster entre DK Nano Technology (China) e Ishihara Sangyo Kaisha (Japão) existe porque ambos detém tecnologias que também tratam da produção de nanopartículas de TiO_2 para aplicações fotocatalíticas, porém destacam nas descrições de seus produtos as performances eficientes e rápidas, compondo assim, junto com a obtenção econômica, estabilidade e vantagens ambientais, as características do produto final.

Figura 90 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Estágio Atual.



Fonte: A autora, 2022.

4.2.2 Curto prazo

No corte temporal para o curto prazo do *technology roadmap*, pode ser observado os atores que detêm as tecnologias em forma de patentes concedidas (Figura 91).

O destaque para o curto prazo, como já mostrado na fase de prospecção tecnológica, foi para a obtenção do NM através da utilização das diferentes classes de matérias-primas, biológica, mineral, sintética e residual. O cessionário que detém essa tecnologia em sua patente é o Yasser Abdul Motalib (Egito), que não possui vínculo declarado com nenhuma instituição. No documento é abordado a utilização em conjunto de materiais para suportar/imobilizar um nanocompósito de ferro magnético, com PVA e PAA, e TiO_2 , revestido em feldspatos e resíduos da agricultura, como palha de arroz e serra (Apêndice B; EG29818). Dessa forma, consegue desenvolver um produto que une no mesmo material as propriedades catalíticas e adsorptivas; e garantir características importantes no NM com relação as expectativas do mercado.

Com relação à existência de mais de uma função no produto final, o destaque é a King Abdulaziz University (Arábia Saudita) e o cluster formado entre Soochow University (China) e S.N. Bose National Centre For Basic Sciences (Índia), que desenvolvem materiais que garantem um sistema de tratamento multifuncional, catalítico, adsorptivo e filtrante. A universidade saudita detém em uma patente, das quatro identificadas no período de tempo analisado no estudo, a síntese de uma folha nanocomposta fotocatalítica de $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{PMMA}$ e de um filtro fibroso composto por nanofibras de $\text{PMMA}/\text{PVDF}/\text{Ag}/\text{CNTs}$ (Apêndice B; US20200247698). Interessante ressaltar que os CNTs foram feitos a partir de cinzas volantes finas, um resíduo mineral produzido a partir da queima de carvão mineral nas centrais termoelétricas. Já no *cluster*, que indica que esses *players* detêm patentes com tecnologias de mesmas taxonomias, a universidade chinesa possui em sua patente uma membrana de nanofibra de carbono, com nanoflocos de dissulfeto de molibdênio (MoS_2), modificada por nanofolhas de carbonato de bismutila ($\text{Bi}_2\text{O}_2\text{CO}_3$) dopado com iodo (I) (Apêndice B; US20190127883); e o instituto indiano aborda em seu documento uma membrana nanocompósita de lúmen de argila de haloisita (HNTs NCs) com carregamento do núcleo de óxidos metálicos ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (Apêndice B; IN201731043481).

Os outros dois *clusters* estabelecidos reúnem um número considerável de *players* que possuem patentes com tecnologias de mesmas taxonomias, um com sete (Apêndice B;

CN105214664A; CN104624222A; US20190366308; IN201711018838; US10882029; US10888845; BR 10 2015 003191 2 B1) e outro com cinco constituintes (Apêndice B; US20210087072; US20190193061; IN201611025631; e US10793684), e o que os difere é apenas a presença da matéria-prima de origem biológica em um deles. Os cessionários presentes nesses conjuntos são, principalmente, universidades (Arábia Saudita, China, Índia e Chile), além de dois sem vínculo institucional (Brasil e Irã) e uma empresa (China). No que se refere ao produto final obtido, as patentes tratam do desenvolvimento de materiais que proporcionam um sistema de tratamento multifuncional, catalítico e adsortivo, além de garantirem as características mercadológicas pertinentes.

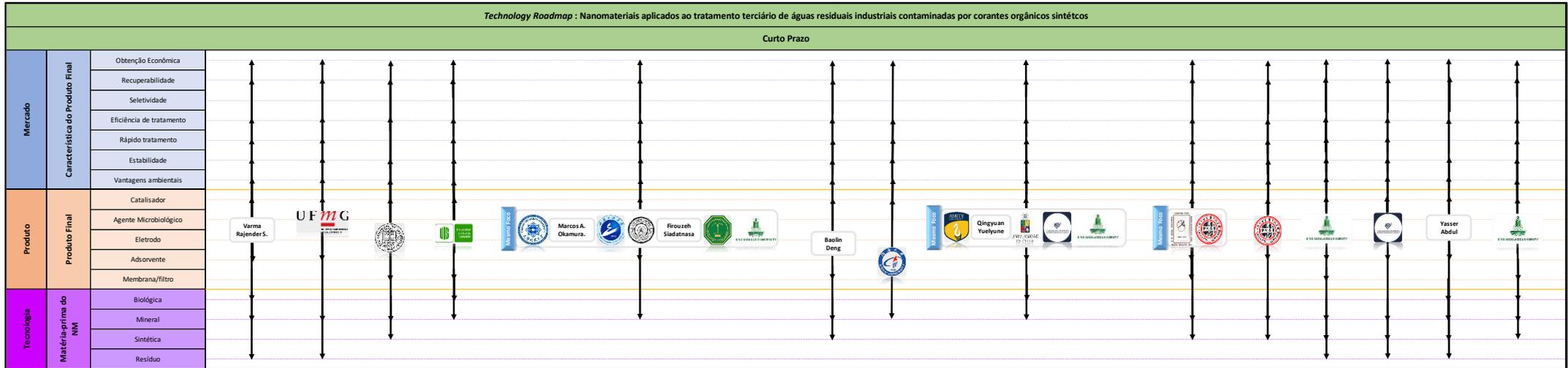
Os representantes brasileiros no mapa são a Universidade Federal de Minas Gerais e o cessionário Marcos A. Okamura, sem vínculo institucional, cada um com uma patente. A patente da UFMG aborda a produção de nanocompósitos magnéticos de Mn_3O_4/Fe_3O_4 utilizando fontes residuais alternativas de manganês (Apêndice B; BR 10 2013 005935 8 B1). Já a patente do Marcos A. Okamura, descreve a produção de nanopartículas catalisadoras depositado sobre superfícies cerâmicas, MnO_2/Al_2O_3 , não limitado a apenas essas substâncias (Apêndice B; BR 10 2015 003191 2 B1).

A única representante industrial desse conjunto é a empresa chinesa Qingyuan Yue Yu New Material Tech Co., Ltd. (China), com uma publicação. O documento descreve a produção de um nanocompósito de celulose/óxido de grafeno/hidrogel Fe_3O_4 , destinado ao uso em reações de tipo Fenton heterogêneas, concedida em 2020 (Apêndice B; CN108579817A).

Nota-se a presença de cinco patentes vinculadas a diferentes inventores sem vínculo com alguma instituição específica, sendo apenas possível saber o país ao qual eles pertencem. São eles: Marcos A. Okamura (Brasil), Varma Rajender S. (EUA), Baolin Deng (EUA), Yasser Abdul (Egito) e Firouzeh Siadatnasab (Irã).

Todos os outros atores encontrados são universidades, como, por exemplo, Imam Abdulrahman Bin Faisal University (Arábia Saudita), Bohai University (China), Indian Institute of Technology Delhi (Índia) e The Regents of the University of California (EUA).

Figura 91 - *Technology raodmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Curto Prazo.



Fonte: A autora, 2022.

4.2.3 Médio prazo

Para o corte temporal de médio prazo do *technology roadmap* obtido, pode-se observar os atores que detêm as tecnologias em forma de patentes solicitadas (Figura 92 e 93).

Destacando produções que utilizam as diferentes classes de matérias-primas, biológica, mineral, sintética e residual, para a obtenção do NM, percebe-se a empresa Henan Shuijingtou Cultural Media Co., Ltd. (China) e a universidade de Amity University (Índia), cessionário com o quantitativo mais expressivo de patentes no período de tempo analisado. A empresa chinesa detém em sua patente a produção de um agente de tratamento de efluentes aquosos da indústria têxtil de impressão e tingimento que garante um sistema de tratamento multifuncional, catalítico, adsorativo e microbiológico, com maiores detalhes já relatados na etapa de prospecção das patentes solicitadas (Apêndice C; CN106587383). Já a universidade indiana relata em sua patente, das quatro que possui, a elaboração de uma biofibra (casca de madeira residual) enxertada com poli-gel híbrido com nanopartículas de CuFe_2O_4 , proporcionando um sistema de tratamento multifuncional, catalítico e adsorativo (Apêndice C; IN201911015554). Além disso, ambos conseguem garantir as características importantes no NM com relação as expectativas do mercado.

No que diz respeito à ocorrência de um produto final multifuncional, a evidência é para seis *players* dispostos no *roadmap*. O Farid Mirhoseini (Irã), a universidade King Fahd University of Petroleum and Minerals (Arábia Saudita) e a empresa Lawrence Livermore National Security, LLC (EUA) desenvolvem materiais que garantem um sistema de tratamento multifuncional do tipo catalítico, adsorativo e filtrante (Apêndice C; WO2018127753; US20190282970 e US20200180969), a saber: nanocompósito de PMMA/Líquido Iônico/ TiO_2 reticulado; membranas de aço inoxidável recozidas contendo Fe_2O_3 ; e membranas cerâmicas porosas revestidas com aerogéis nanoestruturados de sílica-titânia ($\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$), respectivamente. Já a empresa Henan Shuijingtou Cultural Media Co., Ltd. (China), destacando-se novamente, garante em seu desenvolvimento um agente de tratamento multifuncional do tipo catalítico, adsorativo e microbiológico (Apêndice C; CN106587383). E a última, a empresa Keronite International Limited (Inglaterra), aborda o desenvolvimento de um dispositivo bio-fotoeletroquímico (célula de combustível microbiano (CCM)), com maiores detalhes também já relatados na etapa de prospecção, que garante um tratamento multifuncional do tipo catalítico, eletroquímico e microbiológico (Apêndice C; WO2013144660).

Acerca das características do produto final e a garantia de cada um dos aspectos mercadológicos avaliados, o destaque é a empresa Keronite International Limited (Inglaterra) e a universidade Jiangsu University of Technology (China) (Apêndice C; WO2013144660 e CN107262111A), que entregam produtos com todos os atributos avaliados, inclusive a seletividade, uma característica que foi pouco evidenciada.

Em relação aos *clusters* formados, o que indica que os *players* detêm patentes com tecnologias de mesmas taxonomias, verifica-se no *roadmap* a presença de sete deles, demonstrando a tendência e o interesse no desenvolvimento dessas tecnologias. Dessa forma, o *clusters* mais significativo, composto por doze representantes, abrange o desenvolvimento de NMs com tecnologias compostas por matéria-prima mineral, produto final que proporciona um sistema de tratamento multifuncional, catalítico e adsortivo, além das características mercadológicas pertinentes, obtenção econômica, recuperabilidade, performances eficientes e rápidas, estabilidade e vantagens ambientais. Os cessionários presentes nesse conjunto são oito universidades (China, Índia e Brasil), um instituto de pesquisa (Índia), uma empresa (China) e dois sem vínculo institucional (China e Austrália) (Apêndice C; CN112588306A; CN109833862A; CN108640197A; CN108503014A; CN108014783A; IN202111015994; IN201911011873; IN201931000965; AU2017101171; WO2014207754; WO2017071580 e BR 10 2018 069217 8 A2).

Os representantes brasileiros no mapa são compostos exclusivamente por universidades e institutos de pesquisa. O maior destaque, como já exposto na etapa de prospecção, é a Universidade Federal de Viçosa com três patentes publicadas, que utilizam no desenvolvimento dos NMs matérias-primas de origem diversificadas, tanto a classe mineral como a biológica (Apêndice C; BR 10 2019 001910 7 A2 e BR 10 2019 001907 7 A2) e resíduo (Apêndice C; BR 10 2016 030179 3 A2), além de proporcionarem com o produto final um sistema de tratamento multifuncional do tipo catalítico e adsortivo. Os outros atores são a Universidade Federal de São Carlos, a Universidade Federal do Pampa, a Universidade Federal de Minas Gerais, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e duas parcerias: Ministério da Ciência e Tecnologia e a Universidade Federal de Pernambuco; e Instituto de Tecnologia e Pesquisa e a Universidade Tiradentes, cada um com uma patente depositada (Apêndice C; BR 10 2018 069217 8 A2; BR 10 2020 018036 3 A2; BR 10 2015 008336 0 A2; BR 10 2018 075168 9 A2; BR 10 2014 031165 3 A2; e BR 10 2018 015844 9 A2).

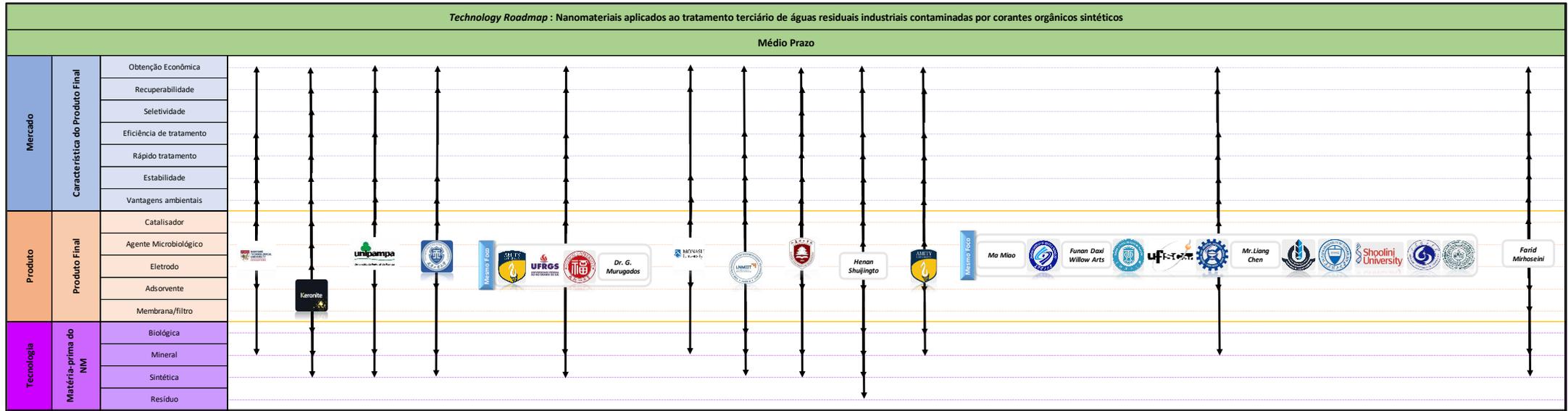
Uma presença mais marcante de empresas aparece nesse conjunto de patentes, com cinco representantes e cada uma com uma única patente. São elas a Henan Shuijingtou Cultural Media Co., Ltd. (China); Lawrence Livermore National Security, LLC (EUA); Keronite

International Limited (Inglaterra); Funan Daxi Willow Arts & Crafts Co., Ltd. (China); e Cambridge Enterprise Limited (Inglaterra). Interessante ressaltar duas desse conjunto, por possuírem interesses e atuações diretamente ligadas às questões de tratabilidade da água e de efluentes contaminados por corantes, a Henan Shuijingtou Cultural Media Co., Ltd. que possui como principais focos o setor ambiental e a tecnologia para o tratamento de água (Apêndice C; CN106587383); e a Funan Daxi Willow Arts & Crafts Co., Ltd. que possui como principais focos o setor de química macromolecular e polímeros e a tecnologia para o tratamento de madeira (Apêndice C; CN108640197A).

Também é notado a presença de quatro patentes vinculadas a diferentes requerentes que não estão representados por nenhuma instituição específica, mas é possível saber as nacionalidades a que pertencem. São eles o Mr. Liang Chen (Austália), Farid Mirhoseini (Irã), Ma Miao (China) e Dr. G. Murugadoss (Índia).

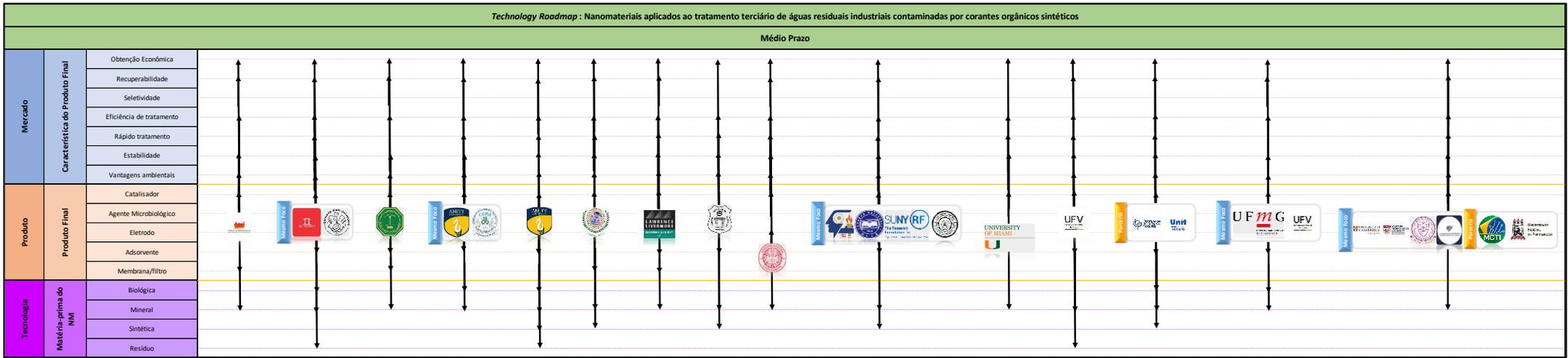
Como grande maioria, todos os outros atores encontrados são universidades ou institutos de pesquisa, como, por exemplo, Indian Institute of Technology Kanpur (Índia), Shandong University of Technology (China), University of Miami (EUA), King Fahd University of Petroleum and Minerals (Arábia Saudita) e Nanyang Technological University (Singapura).

Figura 92 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Médio Prazo – Parte 1.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 93 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Médio Prazo – Parte 2.



Fonte: A autora, 2022.

4.2.4 Longo prazo

Finalmente, para o corte temporal de longo prazo do *technology roadmap*, pode-se observar os atores que detêm as tecnologias em forma de artigos publicados (Figura 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102 e 103). Devido ao grande número de atores encontrados e a extensão do mapa elaborado, este foi segmentado em várias partes a fim de que fosse possível verificar todos os representantes envolvidos.

Como já mencionado, a entrada em peso de instituições chinesas é o maior destaque deste corte temporal, com 78 artigos publicados. Desse conjunto, 69 publicações foram feitas por universidades, 5 por parceria entre universidades e institutos de pesquisa e 4 por parceria entre universidades e empresas, abrangendo assim 66 diferentes instituições. Só a Chinese Academy of Sciences soma 7 artigos, mas o que não limita sua participação, visto que outros diversos institutos espalhados nas várias cidades do país fazem parte desse órgão governamental. Ele funciona como o centro nacional de pesquisa da China e foi responsável pela criação de diversas empresas no país.

As três únicas instituições que aparecem no mapa com artigos sobre produções que utilizam todas as classes de matérias-primas, biológica, mineral, sintética e residual, para a obtenção do NM, são a Zhejiang University of Technology (China), a Ningde Normal University (China) e a parceria entre Academy of Scientific and Innovative Research e Council of Scientific & Industrial Research (CSIR) (Índia). A Zhejiang University of Technology menciona em seu estudo o desenvolvimento de um nanocompósito ternário consistindo de grafeno dopado com nitrogênio (NGR), dióxido de titânio (TiO_2) e carvão ativado à base de casca de coco (AC) (NGRT@AC), depositado na superfície de uma membrana de polissulfona (PSF). Já a publicação da Ningde Normal University abrange um adsorvente barato e eficiente para a remoção de Hg(II) baseado em brácteas de milho (CB) carregado com nanopartículas de sulfeto de cobre (CuS), e o material adsorvido de Hg(II) foi reutilizado como fotocatalisador (CB/CuS/HgS) para a degradação do corante rodamina B. E com relação à publicação da parceria indiana, é relatado a produção de nanoestruturas plasmônicas (PAg-CQDs) decoradas em nanofibras de TiO_2 (PAg@CQD/ TiO_2), em que os CQDs (pontos quânticos de carbono) são obtidos por meio de uma abordagem de síntese verde a partir de resíduos de Citrus limetta. Mas quando se analisa especificamente a utilização de materiais biológicos, minerais e residuais para a produção do NM, percebe-se uma ocorrência maior, com aparições vinculadas à 18

diferentes instituições e nacionalidades (China, Índia, Irã, Vietnã, Emirados Árabes Unidos, Etiópia, Coreia do Sul, Índia, Portugal, Brasil, Estados Unidos, África do Sul e Paquistão), com ocorrências mais acentuadas a partir do ano de 2018.

No que diz respeito à ocorrência de um produto final multifuncional, pode ser notado que a maior abrangência é para a presença de produtos com funções catalíticas e adsorptivas. Foram 92 publicações, de 27 nacionalidades diferentes, desenvolvendo esse tipo de sinergismo para a aplicação no tratamento de efluentes aquosos, que seguiu uma crescente de publicações desde 2014, apresentando o maior quantitativo no ano de 2021, com 22 artigos. Já no produto associado a três funções, o destaque é para a combinação catalisador, adsorvente e membrana/filtro, com 8 publicações, sendo 7 de origem chinesa e apenas uma representante italiana, datados mais recentemente a partir de 2017. Nota-se que nesses desenvolvimentos foi quase que unânime a presença de matéria-prima de origem biológica, exceto por um documento. Interessante mencionar a Beijing University of Chemical Technology (China), que possui duas dessas publicações, ambas abrangendo a utilização de quitosana, sendo uma a preparação de nanoheterojunções de $\text{Ag}_2\text{O-TiO}_2$ revestidas em filme de polipropileno (PP) à base de quitosana e a outra a síntese de uma membrana nanocomposta de quitosana/ $\text{TiO}_2@g\text{-C}_3\text{N}_4$. Outra representante válida de ser comentada é a parceria entre a Guangxi University e Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co, Ltd., que relata um método eficiente, verde e conveniente para gerar nanopartículas de ouro (Au NPs) e ancorá-las em madeira (*Paulownia Sieb. e Zucc*) (AuNP/Madeira), de maneira a estabelecer uma membrana que compõe um reator destinado ao tratamento de efluente contaminado com o corante azul de metileno (MB).

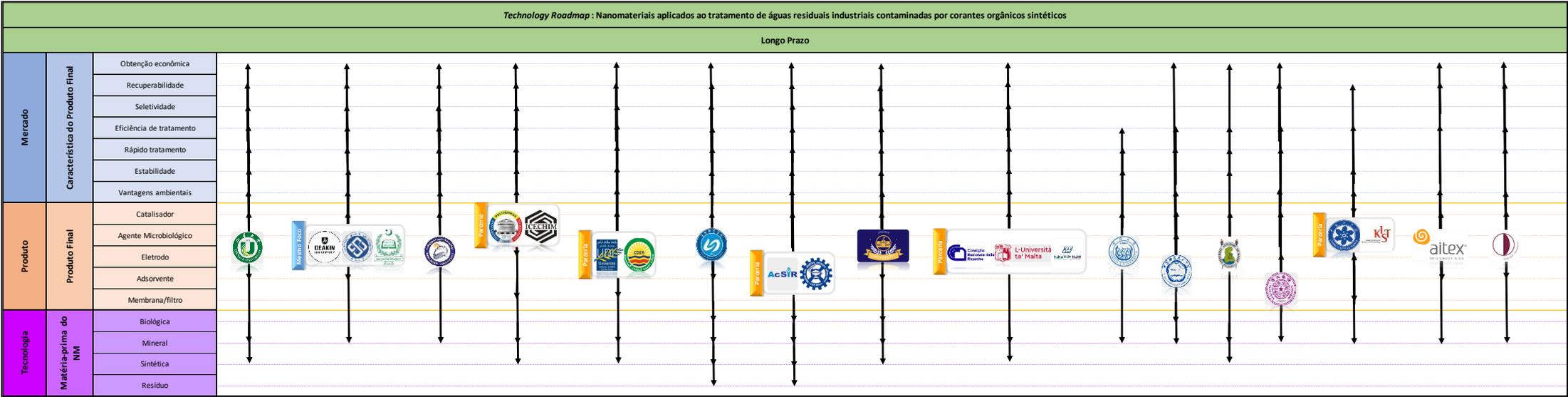
Acerca das características do produto final e a garantia de cada um dos aspectos mercadológicos avaliados, o destaque é para 11 publicações (China, Índia, Argélia, Romênia, Itália, Austrália, Paquistão e Egito) que entregam produtos com todos os atributos avaliados, inclusive a seletividade, e essas ocorrências tiveram aparições mais expressivas a partir de 2018. Interessante a o artigo elaborado pela Jiangsu University (China), que aborda a obtenção de nanocompósitos altamente seletivos de impressão molecular MIPRhB-PPy/ TiO_2 , preparados com sucesso pela técnica de impressão molecular de superfície com rodamina B (RhB) como molécula modelo. Esse NM possui forte afinidade, alta capacidade e rápida taxa de adsorção para RhB, além de excelente seletividade de reconhecimento para RhB e degradação fotocatalítica seletiva. Mas, de uma forma geral, os artigos abrangem bem as características mercadológicas pertinentes, o que é bastante vantajoso para os NMs produzidos.

Em relação aos *clusters* formados, o que indica que os *players* detêm patentes com tecnologias de mesmas taxonomias, verifica-se no *roadmap* a presença de 26 deles, demonstrando a tendência e o interesse no desenvolvimento dessas tecnologias. Dessa forma, o *clusters* mais significativo é composto por 25 representantes, abrangendo um total de 26 artigos produzidos a partir de 2014, originários da China, Índia, Espanha, Estados Unidos, Irã, México, Paquistão, Coreia do Sul, Argélia, Vietnã e Malásia. Eles relatam o desenvolvimento de NMs com tecnologias compostas por matéria-prima mineral, produto final que proporciona um sistema de tratamento multifuncional do tipo catalítico e adsorativo, além das características mercadológicas pertinentes, obtenção econômica, recuperabilidade, performances eficientes e rápidas, estabilidade e vantagens ambientais.

O Brasil aparece com cinco representantes no mapa no longo prazo, com publicações que ocorreram a partir de 2015, compostos exclusivamente por universidades e institutos de pesquisa. São eles a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em parceria com Instituto Nacional de Tecnologia, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Itajubá, Universidade Federal de Lavras (UFLA) com a parceria da Bioproducts Research Unit e Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRGN), cada um com uma publicação apenas. Válido destacar as produções da UFRGS, UFLA e UFRGN, que conseguiram utilizar matérias-primas de origem adicional a mineral, como a biológica, sintética e residual, no desenvolvimento dos NMs, além de proporcionarem um produto final do tipo catalítico e adsorativo e as características mercadológicas pertinentes, obtenção econômica, recuperabilidade, performances eficientes e rápidas, estabilidade e vantagens ambientais. Os NMs preparados foram: TiO_2 sob suporte cerâmico poroso (60% de argila vermelha e 40% de resíduos de pó de vidro e de erva-mate); catalisador híbrido usando nanofibrilas de celulose e magnetita (Fe_3O_4); e fibras de sisal moldadas e revestidas com nanopartículas de TiO_2 , respectivamente.

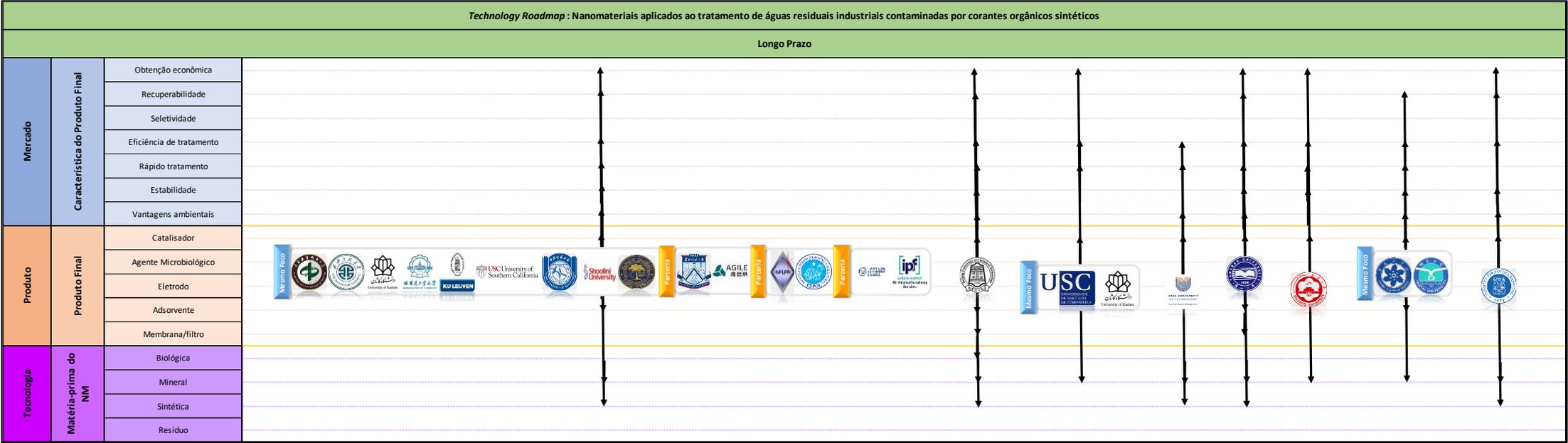
A presença de empresas ocorre exclusivamente através de parcerias com universidades e/ou institutos de pesquisa. Das seis representantes, quatro são de origem chinesa, uma indiana e uma italiana, que tiveram aparições apenas nos anos de 2020 e 2021. Interessante destacar três das empresas chinesas, a Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co, Ltd., Agile Environmental Protection Group, Yulin Xintao Environmental Protection Technology Co., Ltd. e ECO Environmental Investment Limited, por serem organizações que estão diretamente ligadas às questões ambientais, atuando no tratamento de resíduos ou no desenvolvimento de negócios e inovações tecnológicas ecologicamente corretos.

Figura 94 - *Technology raodmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 1.



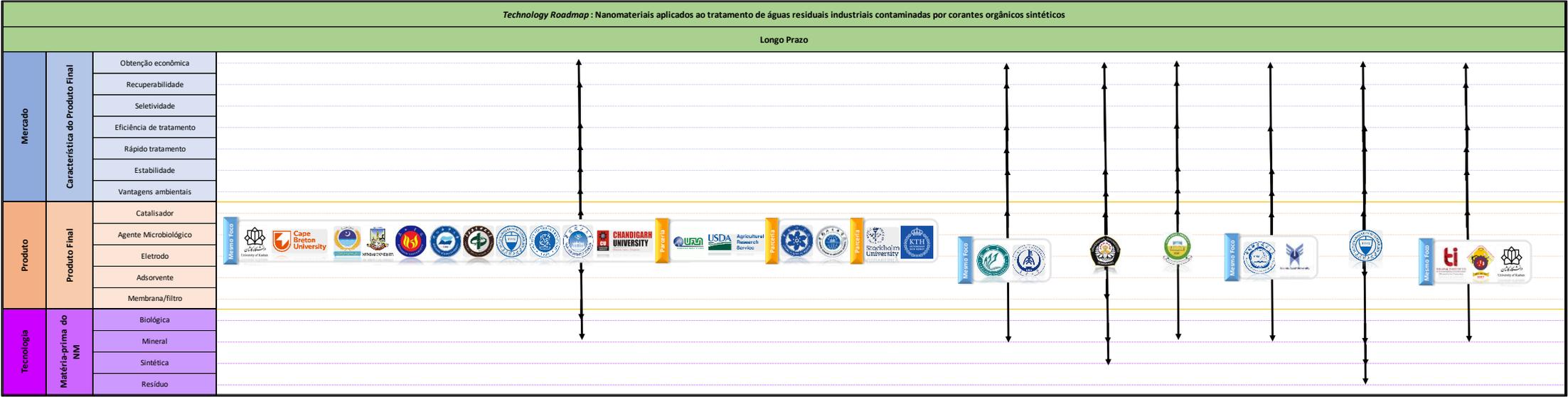
Fonte: A autora, 2022.

Figura 96 - *Technology raodmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 3.



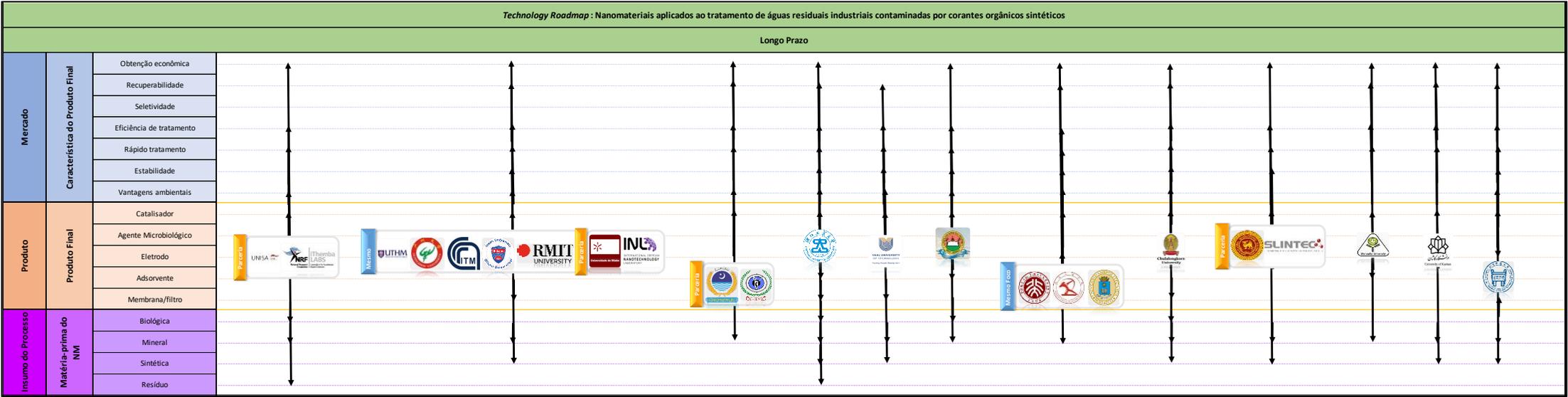
Fonte: A autora, 2022.

Figura 97 - Technology raodmap: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 4.



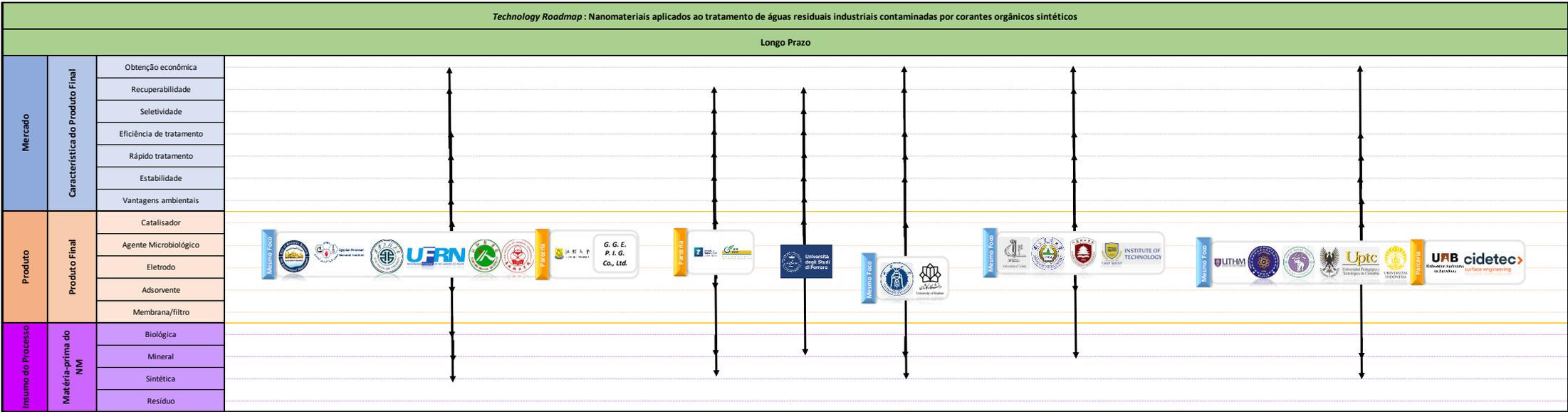
Fonte: A autora, 2022.

Figura 98 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 5.



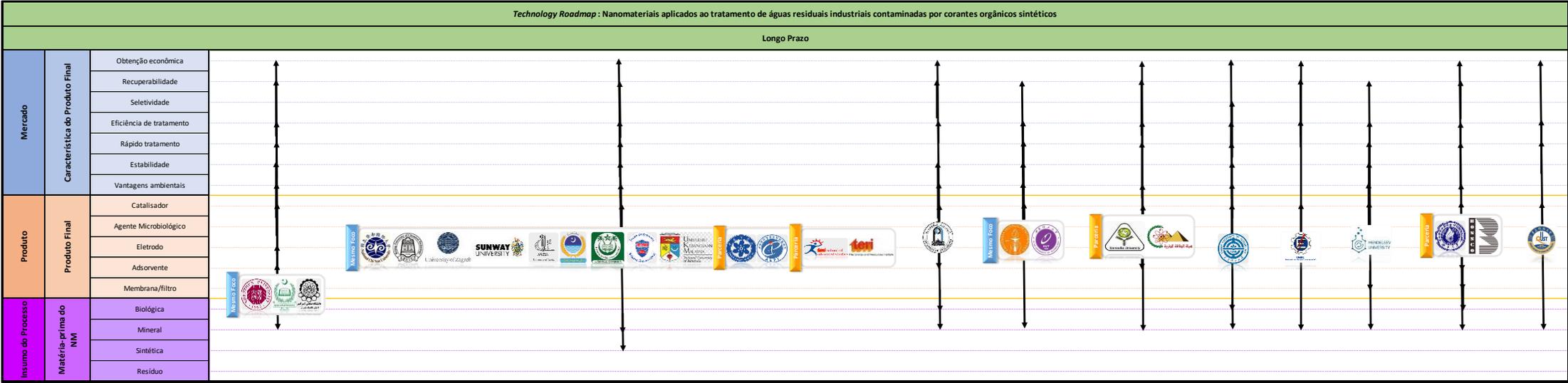
Fonte: A autora, 2022.

Figura 99 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 6.



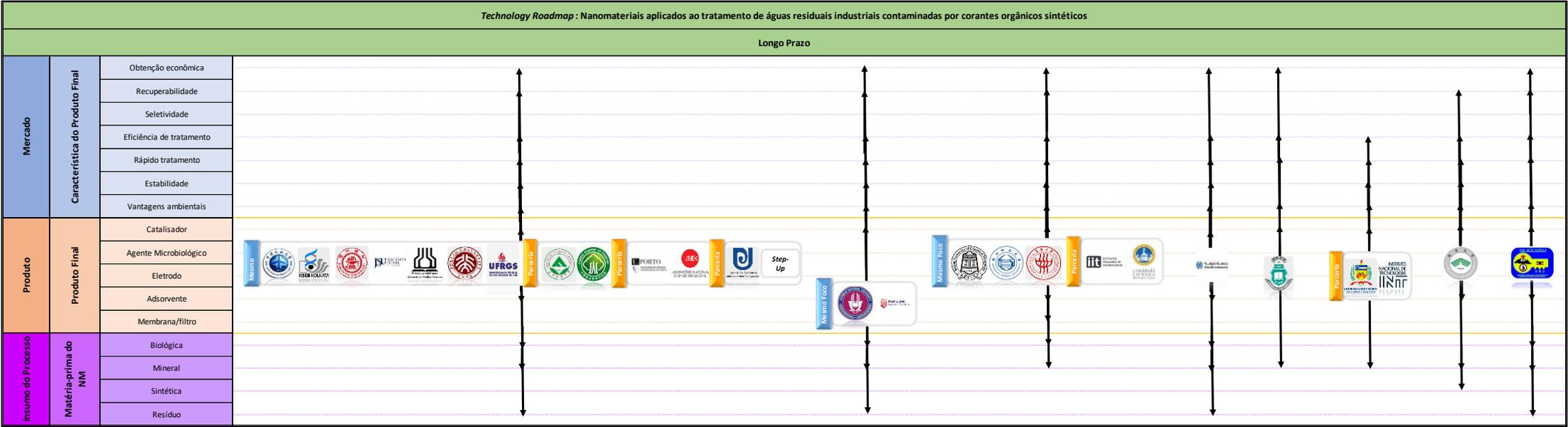
Fonte: A autora, 2022.

Figura 100 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 7.



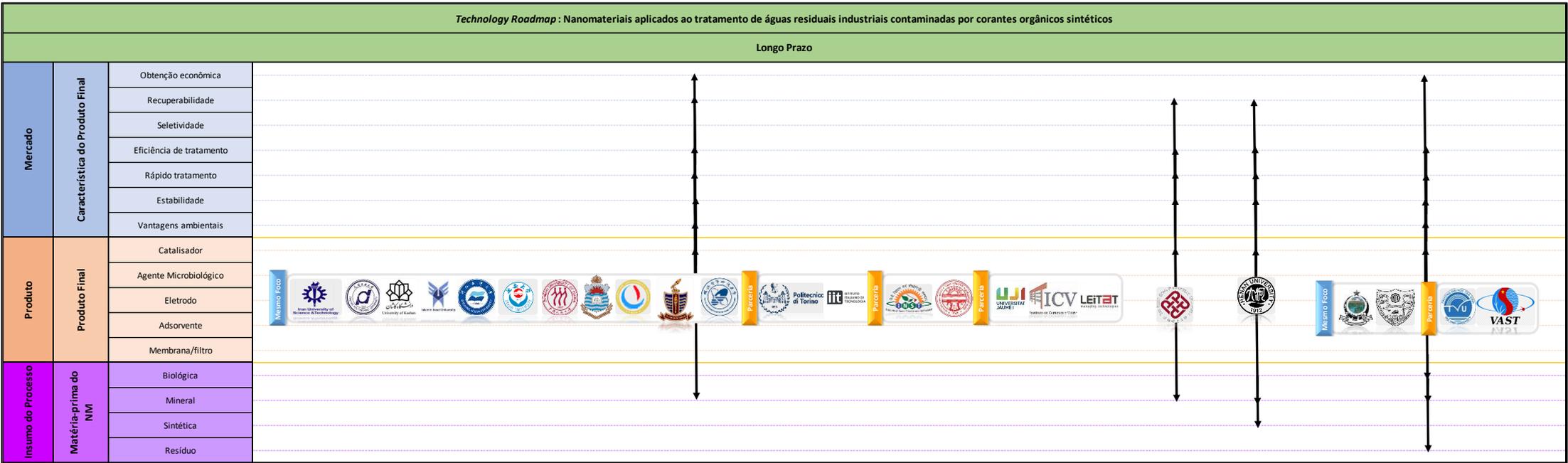
Fonte: A autora, 2022.

Figura 101 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 8.



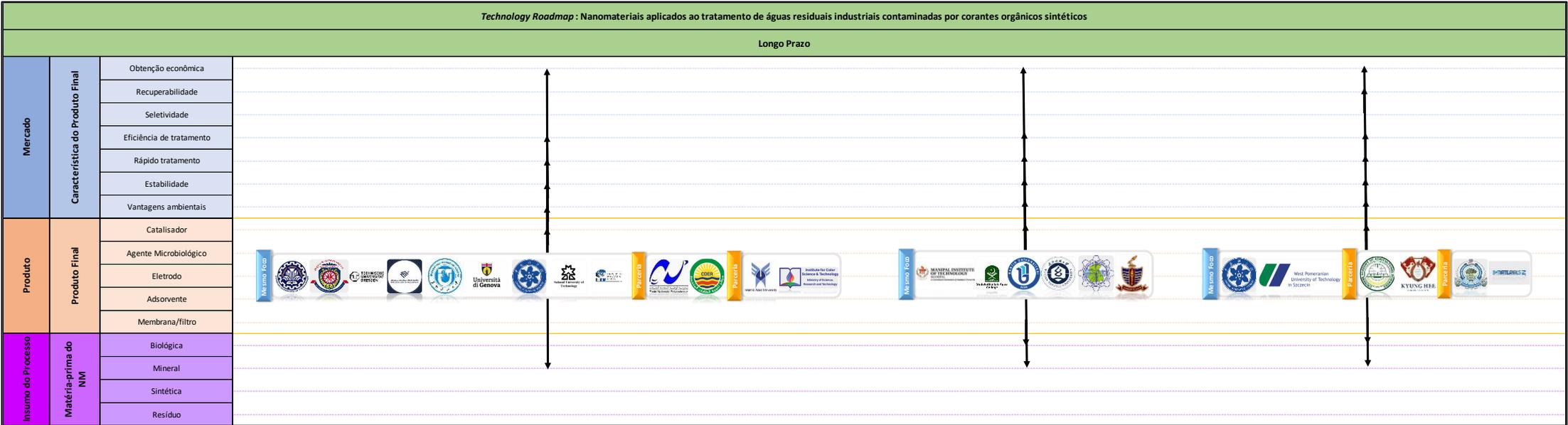
Fonte: A autora, 2022.

Figura 102 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 9.



Fonte: A autora, 2022.

Figura 103 - *Technology roadmap*: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos: Longo Prazo – Parte 10.



Fonte: A autora, 2022.

CONCLUSÃO

A disponibilidade limitada de fontes de água potável e o aumento da demanda desse recurso, para suprir as necessidades de desenvolvimento das nações, geram um cenário mundial preocupante, visto a iminência ou a já vivenciada escassez do recurso hídrico nos diversos países ao redor do mundo. Contribuindo ainda mais para o agravamento dessa situação, o descarte ilegal e inadequado de águas residuais industriais contendo corantes orgânicos sintéticos e derivados possuem potencial de contaminação dos corpos de água receptores (comprometendo sua disponibilidade e inviabilizando seu uso) e de geração de danos ao ecossistema (representando riscos ecológicos e toxicológicos). As dificuldades encontradas pelos fabricantes desses compostos, assim como as indústrias usuárias, em cumprir as regulamentações sobre o padrão de qualidade das águas residuais, justificam-se pelo fato de serem poluentes recalcitrantes bastante estáveis que os processos convencionais de tratamento não conseguem desempenhar a função da forma desejável. Dessa forma, a inovação proporcionada pelo avanço nanotecnológico tem o potencial de garantir soluções mais eficientes e ambientalmente amigáveis dos problemas enfrentados pelos setores industriais atingidos.

Nesse estudo, foi criado um *technology roadmap* para os NMs aplicados ao tratamento terciário de águas residuais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos. Os objetivos principais foram a identificação das tendências tecnológicas e o rastreamento dos atores e suas respectivas expertises. A obtenção dessas informações e a sua disposição final serão relevantes para tomadas de decisão de empresas interessadas na aplicação da nanotecnologia na área de tratamento de efluentes aquosos industriais.

Efetuada uma contextualização sobre o período analisado no mapa, de 2011 a 2021, viu-se uma grande tendência de crescimento dos estudos e desenvolvimentos com a aplicação dos NMs nas técnicas de tratamento de águas residuais industriais. Esses materiais são elencados como a melhor alternativa para garantir eficiência, rapidez, economicidade e vantagens ambientais nos processos de degradação das espécies orgânicas contaminantes avaliadas. Seu potencial de tornar-se um substituto de melhor performance aos materiais em maior escala utilizados atualmente também contribuiu com o aumento do interesse dos pesquisadores e do mercado.

Pela análise global, envolvendo os diversos países que tem produção ou tecnologia voltados para esse tipo de desenvolvimento, foi possível perceber que há um predomínio da participação dos países orientais, como a China, Índia, Japão, Arábia Saudita e Irã, mas já com um aumento de interesse no ocidente, como nos EUA, Brasil, Inglaterra e Austrália.

No contexto de liderança tecnológica, a produção em larga escala de nanocatalisadores aplicáveis ao tratamento de água é identificada nos EUA (KRONOS Worlwide, QuantumSphere, Hyperion Catalysis International e Mach I), China (TitanPE Technologies e DK Nano Technology), Japão (Ishihara Sangyo Kaisha e Sakai Chemical) e Arábia Saudita (CRISTAL) principalmente, com empresas que se mostram bem estabelecida no mercado mundial. Já com relação a a liderança na produção tecnológica e científica, através de artigos e patentes, tem-se a China, Índia e Arábia Saudita, com os principais *players* sendo as universidades Chinese Academy of Sciences, Amity University e King Abdulaziz University, respectivamente.

De uma forma geral, analisando a propensão das espécies químicas utilizadas na composição final dos NMs desenvolvidos, os destaques são para os elementos metálicos titânio, ferro, zinco, prata, silício e cobre, sob a forma de óxidos principalmente, e o não metálico carbono, sob a forma de grafeno em especial, um dos alótropos sintéticos desse elemento.

Uma tendência bem evidente foi a busca pela produção de NMs com matérias-primas diversificadas, principalmente em curto prazo que teve os quantitativos mais expressivos para as classes sintética (41%), biológica (33%) e resíduo (22%). Com relação à utilização dos materiais biológicos, nota-se que a seleção e aplicação de insumos ambientalmente amigáveis possui interesse e viabilidade técnica para uma aplicação em maior escala, garantindo contribuições relevantes para o segmento de produção dos nanocatalisadores, assegurando um desenvolvimento industrial mais sustentável.

Já a respeito dos materiais residuais, sua aplicação também merece notoriedade, pela razão de a disposição de forma adequada dos resíduos industriais e urbanos ser um dos maiores desafios da sociedade, de maneira que a utilização desses insumos como matéria-prima se torna uma das principais fontes economicamente viáveis e ecologicamente corretas para o setor de produção de NMs. Nesse sentido, o Brasil, representado pela UFV, Instituto de Tecnologia e Pesquisa (ITP), UFRGS, UFLA, UFRN e UFMG, encontra-se entre os *players* que trazem essa tendência do uso de insumos biológicos e residuais para obtenção do NM.

Assim, essa tecnologia que envolve matérias-primas diversificadas torna-se mais interessante principalmente pela difusão dos conceitos da economia circular, que associa o desenvolvimento econômico a um melhor uso de recursos naturais, fazendo o uso de novos

modelos de negócios e da otimização nos processos de fabricação com menor dependência de matéria-prima virgem, favorecendo insumos mais duráveis, recicláveis e renováveis, sendo um possível direcionador para priorização de investimentos no país.

Também é notado forte tendência da presença de substratos com a função de suporte no NM projetado para o curto, médio e longo prazo, marcada por substâncias de origem mineral e carbonácea predominantemente. Essa imobilização/suportação traz benefícios consideráveis para a técnica de tratamento, proporcionando uma maior estabilização dos NMs, benefícios de desempenho e facilidade na recuperação dos NMs, significando que nenhuma etapa adicional (filtração, centrifugação) é necessária, não havendo um custo extra para remover e reciclar o nanofotocatalisador após o uso. Destaca-se a empresa Hyperion Catalysis International (EUA), que possui produção em larga escala especializada em CNTs como a finalidade de suportar os nanocatalisadores, o que é de grande relevância, visto que um dos desafios contínuos na aplicação dos NMs nas técnicas de tratamento é o fato de que eles na forma dispersa podem fluir facilmente para o fluxo de água e induzir poluição secundária no processo.

Outra tendência encontrada foi a busca por produtos finais que apresentam na mesma estrutura funções combinadas de catalisador, adsorvente e membrana/filtro principalmente, proporcionando a existência de efeitos sinérgicos das diferentes técnicas de tratamento (Catálise/Adsorção, Catálise/Filtração e Catálise/Adsorção/Filtração). Dessa forma, garante-se o melhoramento de performance dos materiais confeccionados, que avançam em direção da multifunção para superar as dificuldades existentes nas suas formas independentes, ficando evidente a inovação proporcionada para produção de novos nanocatalisadores destinados ao tratamento de efluentes aquosos, que contribui para técnicas mais eficientes. A empresa Sakai Chemical (Japão) já produz e comercializa NMs multifuncionais através da associação diferentes espécies químicas na composição final do material, entregando produtos mais promissores para o tratamento de águas devido aos efeitos sinérgicos da catálise e adsorção.

Além disso, evidencia-se o grande interesse pelos processos foto assistidos (UV-Vis), de maneira que os NMs projetados são do tipo fotocatalisadores predominantemente e tendem a serem responsivos não só a irradiação de luz UV, mas também de luz visível, de modo a aumentar a capacidade de amarrar o espectro solar (2% UV e 47% Vis) e permitir a utilização da luz do sol como fonte de radiação do sistema, uma fonte abundantemente disponível que permite economizar o recurso energético.

No que se refere às características do produto final, existe uma expressiva tendência de garantir NMs com excelentes performances, seja em relação à eficiência de degradação dos poluentes, quanto ao tempo de duração do processo, além de assegurar aspectos de obtenção

econômica, estabilidade, vantagens ambientais e recuperabilidade para os materiais projetados, tornando os produtos mais acessíveis, adequados para aplicação, com baixo risco de toxicidade e viáveis de reutilizar, atendendo assim às expectativas do mercado.

Desse modo, conclui-se que os NMs aplicados a fotocatalise heterogênea são amplamente estudados e os mais favoráveis para tratamento de águas residuais e degradação de poluentes persistentes como os corantes orgânicos sintéticos, prometendo avançar na nanociência de materiais alternativos. Essa técnica de tratamento é um processo ecossustentável e promissor entre os POAs, que envolve a geração de radicais hidroxila para promover a mineralização total dos compostos orgânicos. As vantagens do processo é sua operação sob condições suaves, ter baixo consumo de energia e ser ambientalmente amigável, sendo os óxidos metálicos semicondutores de tamanho nano considerados os mais eficientes por sua grande área de superfície, baixo custo, longa vida útil, excelente estabilidade química e térmica e baixa toxicidade. No entanto, a tecnologia ainda é incipiente, visto que existem propriedades e processos fundamentais dos NMs que precisam ser entendidos para aumentar o desempenho e a eficiência dos sistemas catalíticos adaptados ao usuário final, garantindo suas reatividades otimizadas e desenvolvimento e implementação em larga escala.

Análise do potencial brasileiro

Uma das principais motivações, colocada nos objetivos deste estudo, era a identificação dos atores e das oportunidades dos NMs para aplicações em técnicas de tratamento terciário de águas residuais industriais para o cenário brasileiro.

O estudo averiguou que Brasil se encontra na posição de produção científica e tecnológica exclusivamente, com desenvolvimentos de artigos e patentes por universidades e institutos de pesquisa, não havendo produção comercial de NMs instalada no país até o momento. A crescente demanda pelos produtos nanotecnológicos, principalmente com matérias-primas diversificadas e capazes de desempenhar variadas funções, torna pertinente a consideração de investimentos, do setor público e/ou privado, na produção desses materiais. Porém, deve ser reforçado que só existirá a possibilidade de aproveitar o potencial tecnológico, que se encontra em desenvolvimento no país, se as universidades, o governo e as empresas interessadas estiverem alinhadas nas metas e no planejamento do futuro dessa tecnologia.

Em relação às universidades e institutos brasileiros atuantes no *roadmap* observa-se: UFMG e o Marcos A. Okamura alocados em curto prazo; UFSCar, Unipampa, Ministério da Ciência e Tecnologia, UFPE, UFMG, UFV, Instituto de Tecnologia e Pesquisa, Unit e UFRGS

alocadas em médio prazo; e a UFSC, Instituto Nacional de Tecnologia, UFRGS, UNIFEI, UFLA e UFRN alocadas em longo prazo. Isso mostra o interesse do país na produção de NMs destinados a aplicação nas técnicas de tratamento terciário de águas residuais contaminadas por substâncias orgânicas, incluindo os corantes sintéticos.

No médio prazo, em que os maiores volumes de produção de patentes são de instituições indianas e chinesas, nota-se que a UFGRS, a UFSCar e parceria do Ministério da Ciência e Tecnologia e a UFPE formam *clusters* com várias dessas organizações, como a Amity University (Índia), Fuzhou University (China), Council of Scientific & Industrial Research (Índia), University of Shanghai for Science and Technology (China), entre outras, de maneira que evidencia possibilidades de parcerias interessantes com os países detentores dessas tecnologias e de ampliação da participação brasileira nesse mercado. Além disso, a UFV mostrou seu elevado interesse nessa área e está alocada em médio prazo, com três patentes solicitadas, uma em 2016 e duas em 2019.

Diante do mapeamento das possibilidades e oportunidades, ainda é necessária uma maior mobilização de esforços em conjunto com os vários atores aqui identificados e o próprio governo para fomentar a participação de empresas nesses desenvolvimentos, o que pode viabilizar maiores investimentos no setor específico de produção de NMs destinados ao tratamento de águas residuais industriais. Devido ao fato da água ser um dos principais insumos necessários para os processos industriais e a imprescindibilidade de preservação e economia do recurso hídrico ainda disponível, ter incentivos que garantam o avanço dessa tecnologia é de fundamental importância uma vez que os NMs proporcionam alta performance nos processos de descontaminação, minimizando os impactos ambientais e estimulando a prática do reuso da água no setor industrial.

Dessa forma, o uso dessa tecnologia está em total consonância com a sustentabilidade, garantindo a preservação do meio ambiente e do recurso hídrico disponível, sendo essencial, então, que seja criada uma agenda de inovação para a nanotecnologia no país, pois somente com o estabelecimento de uma direção a ser seguida será possível percorrer o caminho correto para a sua consolidação no âmbito nacional.

Direções futuras de pesquisa

O conhecimento gerado e as tendências identificadas pelo *roadmap* serão aplicadas no desenvolvimento de novas linhas de pesquisas e trabalhos, principalmente no que se refere a definição do tema da tese de doutorado que ocorrerá na sequência.

Assim, os principais pontos que podem ser elencados são:

- ❖ O dióxido de titânio (TiO_2) é uma das principais substâncias presentes na composição dos NMs elaborados identificados, devido as suas propriedades fotocatalíticas, estabilidade, baixo custo e baixa toxicidade, mas a presença de estudos e desenvolvimentos que fazem o uso de outros metais e de combinações de substâncias para a produção dos NMs abre mais opções para o setor. Com garantias de performances tão boas quanto as do titânio, elementos metálicos como o ferro, zinco, cobre, níquel, bismuto e prata são outras opções que aumentam as possibilidades de novos desenvolvimentos dos NMs com propriedades não só catalíticas, mas adsorptivas, filtrantes, entre outras, para aplicações no tratamento de águas residuais industriais.
- ❖ O apelo por produtos ecologicamente corretos, que utilizam matérias-primas de origem biológica e/ou de fontes residuais pode tornar esses materiais mais atrativos, impulsionando a sua utilização nas aplicações ambientais, visto que ainda existe uma preocupação acerca dos efeitos toxicológicos que os NMs podem causar.
- ❖ A presença de substratos que proporcionam a suportaçã das NPs também é um aspecto que predomina e possui grande interesse, visto que garantem melhores performances do catalisador e facilitam sua recuperação, bem como reduzem a possibilidade de perda e de uma contaminação secundária durante a aplicação desses materiais no tratamento das águas residuais industriais.

REFERÊNCIAS

ABDUL RAHMAN, I.; AYOB, M. T. M.; RADIMAN, S. Enhanced photocatalytic performance of NiO-decorated ZnO nanowhiskers for methylene blue degradation. Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Nanotechnology*, v. 2014, n. 212694, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/212694>. Acesso em: 02 nov. 2021.

ABID, N.; KHAN, A. M.; SHUJAIT, S.; CHAUDHARY, K.; IKRAM, M.; IMRAN, M.; HAIDER, J.; KHAN, M.; KHAN, Q.; MAQBOOL, M. Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 300, n. 102597, February 2022.

ADELEYE, A. S.; CONWAY, J. R.; GARNER, K.; HUANG, Y.; SU, Y.; KELLER, A. A. Engineered nanomaterials for water treatment and remediation: Costs, benefits, and applicability. *Chemical Engineering Journal*, v. 286, p. 640 – 662, February 15, 2016.

AHMED, S. F.; MOFIJUR, M.; NUZHAT, S.; CHOWDHURY, A. T.; RAFA, N.; UDDIN, M. A.; INAYAT, A.; MAHLIA, T. M. I.; ONG, H. C.; CHIA, W. Y.; SHOW, P. L. Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, v. 416, n. 125912, August 2021.

AL-DEGS, Y.; KHRAISHEH, M. A. M.; ALLEN, S. J.; AHMAD, M. N. Effect of carbon surface chemistry on the removal of reactive dyes from textile effluente. *Water Res.*, v. 34, n. 3, p. 927-935, 2000.

AL-JOHANI, H. et al. The structure and binding mode of citrate in the stabilization of gold nanoparticles. *Nature Chemistry*, v. 9, n. 9, p. 890, 2017.

ALMEIDA, L C.; SILVA, B. F.; ZANONI, M. V. B. Combined photoelectrocatalytic/electro-Fenton process using a Pt/TiO₂NTs photoanode for enhanced degradation of an azo dye: a mechanistic study. *Journal os Electroanalytical Chemistry*, v. 734, p. 43-52, nov. 2014.

ALVES DE LIMA, R. O.; BAZO, A. P.; SALVADORI, D. M. F.; RECH, C. M.; OLIVEIRA, D. P.; UMBUZEIRO, G. A. Mutagenic and carcinogenic potential of a textile azo dye processing plant effluente that impacts a drinking water source. *Mutation Research*, v. 626, n. 1-2, p. 53-60, 2007.

AOUDJIT, L.; MARTINS, P.; MADJENE, F.; PETROVYKH, D.; LANCEROS-MENDEZ, S. Photocatalytic reusable membranes for the effective degradation of tartrazine with a solar photoreactor. *J. Hazard. Mater.*, v. 344, p. 408–416, 2018.

ARSHAD, A.; IQBAL, J.; AHMAD, I.; ISRAR, M. Graphene/Fe₃O₄ nanocomposite: Interplay between photo-Fenton type reaction, and carbono purity for the removal of methyl orange. *Ceramics International*, v. 44, n. 3, p. 2643–2648, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.08.157>. Acesso em: 25 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. Corantes e Pigmentos. ABIQUIM, 2006a. Disponível em: <http://www.abiquim.org.br/corantes/cor.asp>. Acesso em: 11 ago. 2021.

BAFANA, A.; DEVI, S. S.; CHAKRABARTI, T. Azo dyes: past, present and the future. *Environmental Reviews*, v. 19, p. 350–370 2011.

BAIG, N.; KAMMAKAKAM, I.; FALATHABE, W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, v. 6, 2021.

BANACH, M.; PULIT-PROCIAK, J. Proecological method for the preparation of metal nanoparticles. *Journal of Cleaner Production*, v. 141, p. 1030-1039, 2017.

BANIN, U.; BEN-SHAHAR, Y.; VINOKUROV, K. Hybrid semiconductor–metal nanoparticles: from architecture to function. *Chemistry of Materials*, v. 26, n. 1, p. 97-110, 2013.

BORSCHIVER, S.; COELHO, K. M.; JESUS, A. O. C.; NUNES, S. B. *Radmap Tecnológico SISAL*. In: 5TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGICAL INNOVATION, v. 2, p. 111-121, 2014.

BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. *Technology roadmap: Planejamento Estratégico para alinhar Mercado-Produto-Tecnologia*. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2016. ISBN: 9788571933866.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 27 fev. 2022.

BUSSINGER, E. C. A.; TOSE, L. P. K. Bioética e nanotecnologia: a moralidade como princípio orientador na busca pela formulação de marcos regulatórios aos nanocosméticos. *Revista de Direito Constitucional e Internacional*, v. 101, p.181-198, maio/jun. 2017. Disponível em: <http://bdjur.stj.jus/jspui/handle/2011/111121>. Acesso em: 12 dez. 2021.

CAPRARESCU, S.; MODROGAN, C.; PURCAR, V.; DANCILA, A.M.; ORBULET, O.D. Study of Polyvinyl Alcohol-SiO₂ Nanoparticles Polymeric Membrana in Wastewater Treatment Containing Zinc Ions. *Polymers*, v. 13, n. 1875, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13111875>. Acesso em: 10 fev. 2022.

CARVALHO, M. M.; FLEURY, A.; LOPES, A. P. An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 80, n. 7, p. 1418 – 1437, September, 2013.

CATHERINE, H. N.; OU, M. H.; MANU, B.; SHIH, Y. Adsorption mechanism of emerging and conventional phenolic compounds on graphene oxide nanoflakes in water. *Science of the Total Environment*, v. 635, p. 629–638, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.389>. Acesso em: 12 nov. 2021.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Publicações*. 2016. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/estudoscgee>. Acesso em: 25 mar. 2022.

CHEQUER, F. M. D.; DORTA, D. J.; OLIVEIRA, D. P. Azo dyes and their metabolites: does the discharge of the azo dye into water bodies represent human and ecological risks? In: HAUSER, P. J. (Ed.). *Advances in Treating Textile Effluent*. Rijeka: In Tech, p. 27-48, 2011.

CHEQUER, F. M. D.; OLIVEIRA, G. A. R.; FERRAZ, E. R. A.; CARDOSO, J. C.; ZANONI, M. V. B.; OLIVEIRA, D. P. Textile Dyes: Dyeing Process and Environmental Impact. In: GUNAY, M. (Ed.). *Eco-Friendly Textile Dyeing and Finishing*. Rijeka: In Tech, 2013.

CHRISTIAN, P.; VON DER KAMMER, F.; BAALOUSHA, M.; HOFMANN, T. Nanoparticles: Structure, properties, preparation and behavior in environmental media. *Ecotoxicology*, v. 17, n. 5, p. 326–43, 2008. Springer. Jul. 06. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10646-008-0213-1>. Acesso em: 16 mar. 2022.

CHEN, P.A.; CHENG, H. C.; SHATKIN, H. P. Activated carbono recycled from bitter- tea and palm shell wastes for capacitive desalination of salt water. *Journal of Cleaner Production*, v. 174, p. 927–932, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.034>. Acesso em: 17 out. 2021

COELHO, G. M. *Prospecção tecnológica: metodologias e experiências nacionais e internacionais*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 2003.

COLLIER, S. W.; STORM, J. E.; BRONAUGH, R. L. Reduction of azo dyes during in vitro percutaneous absorption. *Toxicology and Applied Pharmacology*, v. 118, n. 1, p. 73-9, 1993.

COLOUR INDEX. *Definitions of a dye and a pigment*. Disponível em: <http://www.colour-index.com/definitions-of-a-dye-and-a-pigment>. Acesso em: 22 set. 2021.

COLOUR INDEX. *Fourth Edition Online*. 2014. Disponível em: https://colour-index.com/assets/files/upl/CI_leaflet.pdf. Acesso em: 22 set. 2021.

COUTINHO, P.; BOMTEMPO, J. V. Roadmap Tecnológico em Matérias-Primas Renováveis: Uma Base para a Construção de Políticas e Estratégias no Brasil. *Química Nova*, v. 34, p. 910-916, 2011.

DANG, Y.; ZHANG, Y.; FAN, L.; CHEN, H.; ROCO, M. C. Trends in worldwide nanotechnology patent applications: 1991 to 2008. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 12, n. 3, p. 687-706, mar. 2010.

DAIM, T. U.; OLIVER, T. Implementing technology roadmap process in the energy services sector: A case study of a government agency. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 75, p. 687-720, 2008.

DE SOUZA, G. D. et al. Prata: breve histórico, propriedades e aplicações. *Educación Química*, v. 24, n. 1, p. 14-16, 2013.

DIDIO, R. J. *Uma nova metodologia para planejamento estratégico utilizando mapas tecnológicos e detecção de frentes emergentes de pesquisa aplicada à radiofarmácia*. 2011. 195 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DIMER, F. A.; FRIEDRICH, R. B.; BECK, R. C. R.; GUTERRES, S. S.; POHLMANN, A. R. Impactos da nanotecnologia na saúde: produção de medicamentos. *Química Nova*, São Paulo, v. 36, n. 10, p. 1520-1526, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010040422013001000007&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 dez. 2021.

DONG, C.; ELDAWUD, R.; WAGNER, A.; DINU, C. Z. Hybrid nanocomposites with enhanced visible light photocatalytic ability for next generation of clean energy systems. *Applied Catalysis A: General*, v. 524, p. 77-84, 25 August 2016.

EALIAS, A. M.; SARAVANAKUMAR, M. P. A review on the classification, characterization, synthesis of nanoparticles and their application. In: IOP CONFERENCE SERIES. *Materials science and engineering*, v. 263, p. 032019, dec. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>. no. 3. Acesso em: 15 out. 2021

ECODEBATE. ONU alerta para riscos globais da poluição química. *Revista eletrônica EcoDebate*, Índice da edição nº 3.233, 2019. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2019/07/02/ecodebate-indice-da-edicao-n-3-233-de-02072019/>. Acesso em: 08 mai. 2022.

EIRMA. *Technology roadmapping—delivering business vision*. Working group report, European Industrial Research Management Association, Paris, v. 52, 1997.

ESPINOSA, J. C.; CATALA, C.; NAVALON, S.; FERRER, B.; ALVARO, M.; GARCIA, H. Iron oxide nanoparticles supported on diamond nanoparticles as efficient and stable catalyst for the visible light assisted Fenton reaction. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 226, p. 242–251, 2018.

FARGHALI, A. A.; ZAKI, A. H.; KHEDR, M. H. Control of Selectivity in Heterogeneous Photocatalysis by Tuning TiO₂ Morphology for Water Treatment Applications. *Nanomaterials and Nanotechnology*, v. 6, n. 12, 2016. Disponível em: doi: 10.5772/62296. Acesso em: 20 out. 2021.

FORSS, J.; WELANDER, U. Biodegradation of azo and anthraquinone dyes in continuous systems. *International Biodeterioration and Biodegradation*, v. 65, p. 227-237, 2011.

FRANCO, R. R. *O mapeamento tecnológico e a gestão de tecnologia no CNPDIA – Embrapa*. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2009.

FRIJTERS, C. T. M. J.; VOS, R. H.; SCHEFFER, G.; MULDER, R. Decolorizing and detoxifying textile wastewater, containing both soluble and insoluble dyes, in a full scale combined anaerobic/aerobic system. *Water Res.*, v. 40, p. 1249-1257, 2006.

GAHLAWAT, G., CHOUDHURY, A.R. A review on the biosynthesis of metal and metal salt nanoparticles by microbes. *RSC Adv.*, v. 9, p. 12944–12967, 2019.

GALLO-CORDOVA, A.; CASTRO, J. J.; WINKLER, E. L.; LIMA, E. JR.; ZYSLER, R. D.; MORALES, M. D. P.; OVEJERO, J.G.; STREITWIESER; D. A. Improving degradation of real wastewaters with self-heating magnetic nanocatalysts. *Journal of Cleaner Production*, v. 308, n. 127385, 25 July 2021.

GALLO-CORDOVA, A.; CASTRO, J.J.; WINKLER, E.L.; LIMA, E. Jr.; ZYSLER, R.D.; MORALES, M.D.P.; Ovejero, J.G.; Streitwieser, D.A. *Improving degradation of real wastewaters with self-heating magnetic nanocatalysts*. Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICMN/CSIC; Madrid, Espanha; 2021.

GALLO-CORDOVA, A.; VEINTEMILLAS-VERDAGUER, S.; TARTAJ, P.; MAZARÍO, E.; DEL PUERTO MORALES, M. G.; OVEJERO, J. Engineering Iron Oxide Nanocatalysts by a Microwave-Assisted Polyol Method for the Magnetically Induced Degradation of Organic Pollutants. *Nanomaterials*, v. 11, n. 1052, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano11041052>. Acesso em: 17 nov. 2021.

GARCIA, M. L.; BRAY, O. H. *Fundamentals of Technology roadmapping*. Sandia Natl. Lab., 1997.

GARRIDO-CARDENAS, J.A.; ESTEBAN-GARCÍA, B.; AGÜERA, A.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J.A.; MANZANO-AGUGLIARO, F. Wastewater Treatment by Advanced Oxidation Process and Their Worldwide Research Trends. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, v. 17, p. 170, 2020.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. *Métodos de pesquisa*. Universidade Aberta do Brasil (UAB/UFRGS); Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GHALY, A. E.; ANANTHASHANKAR, R.; ALHATTAB, M.; RAMAKRISHNAN, V. V. Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, v. 5, n. 1, p. 1-18, 2014.

GOLMOHAMMADI, M.; AHMADI, S. J.; TOWFIGHI, J. Catalytic supercritical water destructive oxidation of tributyl phosphate: Study on the effect of operational parameters. *Journal of Supercritical Fluids*, v. 140, p. 32–40, 2018.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Textile dyes. *Química Nova*, v. 23, p. 71-8, 2000.

HABA, B. *Microelectronic packages with nanoparticle joining*. U.S. Patent, n. 8,580,607, 12 nov. 2013.

HADEF, F. An introduction to nanomaterials. *Cham: Springer*, p. 1–58, 2018.

HASSANI, A. B.; SHABANOV, N. S.; ORUDZHEV, F. F. Influence of oxygen pressure to photoelectrochemical oxidation CI direct black 22 on TiO₂ nanotube array photoanode. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 15, n. 8, p. 1609–1618, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1523-8>. Acesso em: 12 jan. 2022.

HASSANI, A.; KARACA, C.; KARACA, S.; KHATAEE, A.; ACISI, O.; YILMAZ, B. Enhanced removal of basic violet 10 by heterogeneous sono-Fenton process using magnetite nanoparticles. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 42, p. 390–402, 2018.

HUNGER, K. *Industrial dyes: chemistry, properties, applications*. Weinheim: Wiley-VCH Publishers, 2003.

IJAZ, I.; GILANI, E.; NAZIR, A.; BUKHARI, A. Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles. *Green Chem Lett Ver*, v. 13, n. 3, p. 59–81, Jul. 02, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1802517>. Acesso em: 15 fev. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *TS 80004 – Nanotechnologies — Vocabulary — Part 1: Core terms*. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-1:ed-2:v1:en>. Acesso em: 15 mar. 2021.

JAMKHANDE, P. G.; GHULE, N. W.; BAMER, A. H.; KALASKAR, M. G. Metal nanoparticles synthesis: an overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *J Drug Deliv Sci Technol*, v. 53, n. 101174, 2019. Editions de Sante. Oct. 01. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101174>. Acesso em: 02 dez. 2021.

JASSBY, D.; CATH., T.Y.; BUISSON, H. The role of nanotechnology in industrial water treatment. *Nature Nanotechnology*, v. 13, p. 670–672, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0234-8>. Acesso em: 05 out. 2021.

JIANG, D. B.; LIU, X.; XU, X.; ZHANG, Y. X. Double-shell Fe₂O₃ hollow box-like structure for enhanced photo-Fenton degradation of malachite green dye. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v. 112, p. 209–215, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2017.09.033>. Acesso em: 10 dez. 2021.

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

KHATAEE, A.; EGHBALI, P.; IRANI-NEZHAD, M. H.; HASSANI, A. Sonochemical synthesis of WS₂ nanosheets and its application in sonocatalytic removal of organic dyes from water solution. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 48, p. 329–339, 2018.

KIMURA, I. Y.; GONÇALVES JR., A. C.; STOLBERG, J.; LARANJEIRA, M. C. M.; FÁVERE, V. T. Efeito do pH e do tempo de contato na adsorção de corantes reativos por microesferas de quitosana. *Polím.: Ciência Tecnol.*, p. 51-57, jul/set, 1999.

KING, P. J.; STAGER, L. E. *Life in Biblical Israel*. Kentucky: Westminster John Knox Press, 2002.

KOLAHALAM, L. A.; KASI VISWANATH, I. V.; DIWAKAR, B. S.; GOVINDH, B.; REDDY, V.; MURTHY, Y. L. N. Review on nanomaterials: synthesis and applications. *Materials today: proceedings*, v. 18, p. 2182–90, Jan 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.371>. Acesso em: 15 dez. 2021.

KUMAR, B. Green Synthesis of Gold, Silver, and Iron Nanoparticles for the Degradation of Organic Pollutants in Wastewater. *J. Compos. Sci.*, v. 5, n. 219, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs5080219>. Acesso em: 13 nov. 2021.

KUMAR, B.; SMITA, K.; DEBUT, A.; CUMBAL, L. Andean Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) leaf-mediated synthesis of Cu₂O nanoparticles: A Low-Cost Approach. *Bioengineering*, v. 79, n. 54, 2020.

KUNZ, A; PERALTA-ZAMORA, P; DE MORAES, S. G.; DURÁN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Química Nova*, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

KUPFER, D.; TIGRE, P. B. *Modelo SENAI de Prospecção*: Documento Metodológico. In: Organización Internacional Del Trabajo CINTERFOR Papeles de La Oficina Técnica, n. 14, cap. 2, 2004.

KUPPUSAMY, P.; ILAVENIL, S.; SRIGOPALRAM, S.; MANIAM, G.P.; YUSOFF, M.M.; GOVINDAN, N.; CHOI, K.C. Treating of palm oil mill effluent using *Commelina nudiflora* mediated copper nanoparticles as a novel bio-control agent. *J. Clean. Prod.*, v. 141, p. 1023–1029, 2017.

LARAIA, L. R. *Fatores alavancadores e desafiadores no uso de mapas de rotas tecnológicas no contexto de instituições de pesquisa públicas*: um estudo de caso. 2015. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

LAZZARETTI, L. L; HUPFFER, H. M. Nanotecnologia e sua regulamentação no Brasil. *RGD*, v. 16, n. 3, p. 153-177, Set./Dez. 2019.

LE, H. N.; BABICK, F.; KÜHN, K.; NGUYEN, M.T.; STINTZ, M.; CUNIBERTI, G. Impact of ultrasonic dispersion on the photocatalytic activity of titania aggregates. *Beilstein J. Nanotechnol.*, v. 6, p. 2423–2430, 2015. Disponível em: [doi:10.3762/bjnano.6.250](https://doi.org/10.3762/bjnano.6.250). Acesso em: 30 set. 2021.

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

LEFEHLD, N. A. S.; BARROS, A. J. P. *Projeto de pesquisa*: propostas metodológicas. Petrópolis, RJ: Vozes, 1991.

LIU, J.; ZHU, X.; ZHANG, H.; WU, F.; WEI, B.; CHANG, Q. Superhydrophobic coating on quartz sand filter media for oily wastewater filtration. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 553, p. 509–514, 2018.

LOOS, M. R. *Nanociência e nanotecnologia: Compósitos Termofixos Reforçados com Nanotubos de Carbono*. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

MA, X.; CHENG, Y.; GE, Y.; WU, H.; LI, Q.; GAO, N.; DENG, J. Ultrasound-enhanced nanosized zero-valent copper activation of hydrogen peroxide for the degradation of norfloxacin. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 40 (Part A), p. 763–772, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.025>. Acesso em: 23 mar. 2022.

MACHADO, A., ZIMMERMANN, G., FEKSA, L., AND BERLESE, D. Applications of nanotechnology in water treatment. *Revista Conhecimento Online*, v. 1, n. 03, 2019.

MAHDIANI, M.; SOOFIVAND, F.; ANSARI, F.; SALAVATI-NIASARI, M. Grafting of CuFe₁₂O₁₉ nanoparticles on CNT and graphene: Eco-friendly synthesis, characterization and photocatalytic activity. *J. Clean. Prod.*, v. 176, p. 1185–1197, 2018.

MAPFRE Global Risks. Disponível em: <https://www.mapfreglobalrisks.com/pt-br/gerencia-ricos-seguros/estudos/a-revolucao-da-nanotecnologia/>. Acesso em: 5 jun. 2022.

MARCONE, G. P. S. Nanotecnologia e Nanociências: Aspectos Gerais, Aplicações e Perspectivas no Contexto do Brasil. *Perspectivas da Ciência e Tecnologia*, v. 7. n. 2, 2015. Disponível em: <http://revistascientificas.ifrj.edu.br:8080/revista/index.php/revistapct/article/view/588/377>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MARTINEZ, M. E. M.; BRAGA JR., E.; ANTUNES, A. *Mapeamento das tecnologias do setor têxtil por meio de documentos patentários depositados no Brasil*. In: 15. CONGRESSO LATINO IBEROAMERICANA DE GESTÃO DE TECNOLOGIA (ALTEC), 2013, Porto (Portugal). Local de publicação: Editoria Científica da Revista, 2013. Disponível em: https://portalseer.ufba.br/index.php/nit/article/view/13332/pdf_167. Acesso em: 11 mai. 2021.

MARTINO, J. P. *Technological forecasting for decision making*. New York: McgrawHill, 1993.

MCDOWALL, W. Technology roadmaps for transition management: The case of hydrogen energy. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 79, n.3, p. 530-542, 2012.

MEISSNER, D.; GOKHBERG, L.; SOKOLOV, A. Science, Technology and Innovation Policy for the Future: Potentials and Limits of Foresight Studies. *Springer Science & Business Media*, 2013.

MENDES JUNIOR, B. O. Setor têxtil – produção, comércio internacional e perspectivas para brasil, nordeste, ceará e pernambuco em 2021. *Caderno Setorial ETENE*, v. Ano 6, n. 185, Setembro, 2021.

MOHAMMADIAN, F. M.; MESDAGHINIA, A. R.; NADDAFI, K.; NASSERI, S.; YUNESIAN, M.; MAZAHERI, A. M.; REZAIIE, S.; HAMZEHEI, H. Optimization of reactiveblue 19 decolourization by Ganoderma sp. using response surface methodology. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, v. 7, n. 1, p. 35-42, 2010.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Principais itens para relatar revisões sistemáticas e meta-análises: A recomendação PRISMA. *Epidemiol. Serv. Saúde*, Brasília, v. 24, n. 2, p. 335-342, junho 2015.

NASROLLAHZADEH, M.; YEK, S.M.-G.; MOTAHHARIFAR, N.; GORAB, M.G. Recent Developments in the Plant-Mediated Green Synthesis of Ag-Based Nanoparticles for Environmental and Catalytic Applications. *Chem. Rec.*, v. 19, p. 2436–2479, 2019.

NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL. *National Research and Development Plan For Aviation Safety, Security, Efficiency and Environmental Compatibility*. 1999. Disponível em: <http://www.hq.nasa.gov/office/hqlibrary/documents/o704129880.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2022.

NDOLOMINGO, M. J.; BINGWA, N.; MEIJBOOM, R. Review of supported metal nanoparticles: Synthesis methodologies, advantages and application as catalysts. *J. Mater. Sci.*, v. 55, p. 6195–6241, 2020.

NGUYEN, V. C. Bifuncional core–shell nanocomposite Mndoped ZnO/Fe₃O₄ for photodegradation of reactive blue 198 dye. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, v. 5, n. 035014, 2014. Disponível em: doi:10.1088/2043-6262/5/3/035014. Acesso em: 10 nov. 2021.

OJHA, A.; TIWARY, D.; ORAON, R.; SINGH, P. Degradations of endocrine-disrupting chemicals and pharmaceutical compounds in wastewater with carbon-based nanomaterials: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021.

OLIVEIRA, M. M.; CASTRO, E.; CANESTRARO, C.; ZANCHET, D.; UGARTE, D.; ROMAN, L. S.; ZARBIN, A. J. G. A simple two-phase route to silver nanoparticles/polyaniline structures. *The Journal of Physical Chemistry B*, v. 110, n. 34, p. 17063-17069, 2006.

OLIVEIRA, M. M.; UGARTE, D.; ZANCHET, D.; ZARBIN, A. J. G. Influence of synthetic parameters on the size, structure, and stability of dodecanethiol-stabilized silver nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 292, n. 2, p. 429-435, 2005.

OLVERA, R. C.; SEIN LEÓN SILVA, S. L.; ROBLES-BELMONT, E.; LAU, E. Z. Review of nanotechnology value chain for water treatment applications in Mexico. *Resource-Efficient Technologies*, v. 3, n. 1, p. 1-11, March 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.01.008>. Acesso em: 25 set. 2021.

PAPADOULOU, K.; KALAGONA, I. M.; PHILIPPOUSSIS, A.; RIGAS, F. Optimization of fungal decolorization of azo and anthraquinone dyes via Box-Behnken design. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 77, p. 31-38, 2013.

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R. Characterisation of technology roadmaps: purpose and format, Management of Engineering and Technology. *PICMET*, Portland, p. 367-374, 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, 2004a. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6). Acesso em: 15 mai. 2021.

PHAAL, R.; MULLER, G. An architectural framework for roadmapping: towards visual strategy. *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, v. 76, p. 39-49, 2009.

PIGNATELLO, J. J.; OLIVEROS, E.; MACKAY, A. Advanced oxidation process for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 36, p. 1-84, 2006.

PIO, M. J. *Estudos de Prospectiva Tecnológica como Ferramenta de Apoio ao Planejamento Estratégico: O Caso Têxtil*. 2004. 309 f Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

POPPER, R. How are foresight methods selected? *Foresight*, v. 10, n. 6, p. 62-89, 2008. Disponível em: doi: 10.1108/14636680810918586. Acesso em: 07 mai. 2021.

POPPER, R.; KORTE, W. *Xtreme euforia: combining foresight methods*. Proceedings of the EU-US Scientific Seminar: New Technology Foresight, Forecasting & Assessment Methods, Seville, Spain, 1, May, 2004.

PORTER, A. L.; ASHTON, W. B.; CLAR, G.; COATES, J. F.; CUHLS, K.; CUNNINGHAM, S. W.; DUCATEL, K.; DUIN, P. VAN DER; GEORGEHIU, L.; GORDON, T.; LINSTONE, H.; MARCHAU, V.; MASSARI, G.; MILES, I.; MOGEE, M.; SALO, A.; SCAPOLO, F.; SMITS, R.; THISSEN, W. Technology futures analysis: toward integration of the field and new methods. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 71, n. 3, p. 287-303, 2004. Disponível em: doi:10.1016/j.techfore.2003.11.004. Acesso em: 15 jun. 2021.

PORTER, A. L.; DETAMPEL, M. J. Technology opportunities analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 49, n. 3, p. 237-255, jul. 1995.

POURZAMANI, H.; MENGELIZADEH, N.; HAJIZADEH, Y.; MOHAMMADI, H. Electrochemical degradation of diclofenac using three-dimensional electrode reactor with multi-walled carbon nanotubes. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 25, p. 24746-24763, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2527-8>. Acesso em: 20 ago. 2021.

PRASAD, P. R.; KANCHI, S.; NAIDOO, E. B. In-vitro evaluation of copper nanoparticles cytotoxicity on prostate cancer cell lines and their antioxidant, sensing and catalytic activity: One-pot green approach. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, v. 161, p. 375-382, 2016.

PROBERT, D. R.; FARRUKH, C. J. P.; PHAAL, R. Technology roadmapping—developing a practical approach for linking resources to strategic goals. *Journal of Engineering Manufacture*, v. 217, n. 9, p. 1183-1195, September 1, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1243/095440503322420115>. Acesso em: 03 jun. 2021.

PURI, C.; SUMANA, G. Highly effective adsorption of crystal violet dye from contaminated water using graphene oxide intercalated montmorillonite nanocomposite. *Applied Clay Science*, v. 166, p. 102-112, 2018.

RAHMAN, A.; LIN, J.; JARAMILLO, F. E.; BAZYLINSKI, D. A.; JEFFRYES, C.; DAHOUMANE, S. A. In Vivo Biosynthesis of Inorganic Nanomaterials Using Eukaryotes—A Review. *Molecules*, v. 25, p. 3246, 2020.

RAMAN, C. D.; KANMANI, S. Textile dye degradation using nano zero valent iron: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 177, p. 341–355, 2016.

RANI, M.; SHANKER, U. Sun-light driven rapid photocatalytic degradation of methylene blue by poly (methyl methacrylate)/metal oxide nanocomposites. *Colloids and Surfaces A*, v. 559, p. 136–147, 2018.

RAUF, M. A.; ASHRAF, S. S. Survey of recent trends in biochemically assisted degradation of dyes. *Chemical Engineering Journal*, v. 209, p. 520–530, 2012.

RAUF, M. A.; MEETANI, M. A.; HISAINDEE, S. An overview on the photocatalytic degradation of azo dyes in the presence of TiO₂ doped with selective transition metals. *Desalination*, v. 276, n. 1-3, p. 13-27, ago. 2011.

RICHTER, B. D. *Em busca da água: um guia para passar da escassez à sustentabilidade*. São Paulo, SP: Editora Oficina de Textos, 2015. ISBN: 9788579751929.

RIDRUEJO, C.; ALCAIDE, F.; ALVAREZ, G.; BRILLAS, E.; SIRES, I. On-site H₂O₂ electrogeneration at a CoS₂-based air-diffusion cathode for the electrochemical degradation of organic pollutants. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v. 808, p. 364–371, 2018.

RIDRUEJO, C.; CENTELLAS, F.; CABOT, P. L.; SIRÉS, I.; BRILLAS, E. Electrochemical Fenton-based treatment of tetracaine in synthetic and urban wastewater using active and non-active anodes. *Water Research*, v. 128, p. 71–81, 2018.

ROBINSON, T.; MCMULLAN, G.; MARCHANT, R.; NIGAM, P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, v. 77, n. 3, p. 247-55, maio 2001.

ROY, A. AND BHATTACHARYA, J. *Nanotechnology in Industrial Wastewater Treatment*. IWA Publishing, 2019. Disponível em: <http://library.oapen.org/bitstream/id/62a5d44a-0a6d-47b6-ad4e-a4a4b466790f/1004278.pdf>. Acesso em: 18 out. 2021.

ROCO, M. C.; HARTHORN, B.; GUSTON, D.; SHAPIRA, P. Innovative and responsible governance of nanotechnology for societal development. *Journal of Nanoparticle Research*, Santa Barbara, v. 13, p. 3557-3590, set. 2011.

SANTO, M. M.; COELHO, G. M.; SANTOS, D. M.; FILHO, L. F. Text mining as a valuable tool in foresight exercises: A study on nanotechnology. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 73, p. 1013-1027, 2006.

SANTOS, M. F. R. F. *Elaboração do Technology roadmap para Biorrefinaria de Produtos da Lignina no Brasil*. 2011. 307 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SARATALE, R. G.; SARATALE, G. D.; CHANG, J. S.; GOVINDWAR, S. P. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 42, n. 1, p. 138-57, jan. 2011.

SARAYU, K.; SANDHYA, S. Current technologies for biological treatment of textile wastewater e a review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 167, p. 645-661, 2012.

SCOPUS. *Scopus Content Coverage Guide*. 2016. Disponível em: https://www.elsevier.com/__data/assets/pdf_file/0007/69451/scopus_content_coverage_guide.pdf. Acesso em: 22 abr. 2022.

SEESURIYACHAN, P.; TAKENAKA, S.; KUNTIYA, A.; KLAYRAUNG, S.; MURAKAMI, S.; AOKI, K. Metabolism of azo dyes by *Lactobacillus casei* TISTR 1500 and effects of various factors on decolorization. *Water Research*, v. 41, n. 5, p. 985-992, 2007.

SHAH, I. S.; POWERS, T. M. Nanotechnology-A parth forward for developing nations. *Materials Science and Engineering*, n. 92, 2015. Disponível em: doi:10.1088/1757-899X/92/1/012001. Acesso em: 07 abr. 2021.

SHANDILYA, P.; MITTAL, D.; SONI, M.; RAIZADA, P.; HOSSEINI-BANDEGHARAEI, A.; SAINI, A. K.; SINGH, P. Fabrication of fluorine doped graphene and SmVO₄ based dispersed and adsorptive photocatalyst for abatement of phenolic compounds from water and bacterial disinfection. *Journal of Cleaner Production*, v. 203, p. 386–399, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.271>. Acesso em: 20 nov. 2021.

SHANKAR, P.D.; SHOBANA, S.A.; KARUPPUSAMY, I.; PUGAZHENDHI, A.; RAMKUMAR, V.S.; ARVINDNARAYAN, S.; KUMAR, G. A review on the biosynthesis of metallic nanoparticles (gold and silver) using bio-components of microalgae: Formation mechanism and applications. *Enzym. Microb. Technol.*, v. 95, p. 28–44, 2016.

SHARMA, V. K.; FILIP, J.; ZBORIL, R.; VARMA, R. S. Natural inorganic nanoparticles—Formation, fate, and toxicity in the environment. *Chem. Soc. Rev.*, v. 44, p. 8410–8423, 2015.

SHATKIN, J. A. *Nanotechnology: Health and Environmental Risks*. 20 ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.

SHORE, J. *Colorants and auxiliaries: organic chemistry and application properties*. v.1. 2.ed. Bradford: Society of Dyers and Colorists, 2002.

SINGH, V.; YADAV, P.; MISHRA, V. Recent advances on classification, properties, synthesis, and characterization of nanomaterials. *Green synthesis of nanomaterials for bioenergy applications*, Wiley, p. 83–97, 2020.

SINGLA, P.; SHARMA, M.; PANDEY, O.P.; SINGH, K. Photocatalytic degradation of azo dyes using Zn-doped and undoped TiO₂ nanoparticles. *Appl. Phys.*, v. 116, p. 371–378, A 2014.

SOENEN, S. J.; PARAK, W. J.; REJMAN, J.; MANSCHAN, B. (Intra)cellular stability of inorganic nanoparticles: Effects on cytotoxicity, particle functionality, and biomedical applications. *Chem. Rev.*, v. 115, p. 2109–2135, 2015.

STARK, W. J.; STOESETT, P. R.; WOHLLEBEN, W.; HAFNER, A. Industrial applications of nanoparticles. *Chem. Soc. Rev.*, v. 44, p. 5793–5805, 2015.

SUN, C.; LI, F.; AN, H.; LI, Z.; BOND, A. M.; ZHANG, J. Facile electrochemical co-deposition of metal (Cu, Pd, Pt, Rh) nanoparticles on reduced graphene oxide for electrocatalytic reduction of nitrate/nitrite. *Electrochimica Acta*, v. 269, p. 733–741, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.03.005>. Acesso em: 23 nov. 2021.

TALEBZADEH, S.; QUEFFELEC, C.; KNIGHT, D. A. Surface modification of plasmonic noble metal–metal oxide core–shell nanoparticles. *Nanoscale Adv.*, v. 1, p. 4578–4591, 2019.

THE UNITED NATIONS WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT (UN WWDR). *Água, uma responsabilidade compartilhada*. UNESCO World Water Assessment Programme, 2006.

THE UNITED NATIONS WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT (UN WWDR). *World: “Water for People, Water for Life”*. UNESCO World Water Assessment Programme, 2003.

TUROLLA, A.; BESTETTI, M.; ANTONELLI, M. Optimization of heterogeneous photoelectrocatalysis on nanotubular TiO₂ electrodes: Reactor configuration and kinetic modelling. *Chemical Engineering Science*, v. 182, p. 171–179, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.02.041>. Acesso em: 2 dez. 2021.

UMBUZEIRO, G. A.; FREEMAN, H. S.; WARREN, S. H.; DE OLIVEIRA, D. P.; TERAQ, Y.; WATANABE, T.; CLAXTON, L. D. The contribution of azo dyes to the mutagenic activity of the Cristais River. *Chemosphere*, v. 60, n. 1, p. 55–64, 2005.

UMBUZEIRO, G. A.; ROUBICEK, D. A.; RECH, C. M.; SATO, M. I. Z.; CLAXTON, L. D. Investigating the sources of the mutagenic activity found in a river using the Salmonella assay and different water extraction procedures. *Chemosphere*, v. 54, p. 1589–1597, 2004.

VASEGHI, Z.; NEMATOLLAHZADEH, A. Nanomaterials. *Green synthesis of nanomaterials for bioenergy applications*, Wiley, p. 23–82, 2020.

VENAULT, A.; CHIANG, C. H.; CHANG, H. Y.; HUNG, W. S.; CHANG, Y. Graphene oxide/PVDF VIPS membranas for switchable, versatile and gravity-driven separation of oil and water. *Journal of Membrana Science*, v. 565, p. 131–144, 2018.

WANG, P. T.; SONG, Y. H.; FAN, H. C.; & YU, L. Bioreduction of azo dyes was enhanced by in-situ biogenic palladium nanoparticles. *Bioresource Technology*, v. 266, p. 176–180, 2018.

WANG, T.; ZHANG, Y.; YU, H.; WANG, F. Y. Advanced Manufacturing Technology in China: A Roadmap to 2050. *Science Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, p. 1–146, 2012.

WANG, Y.; LIU, Y.; YU, Y.; HUANG, H. Influence of CNT-rGO composite structures on their permeability and selectivity for membrana water treatment. *Journal of Membrana Science*, v. 551, p. 326–332, 2018.

WILLYARD, C. H.; MCCLEES C.W. Motorola's technology roadmapping process. *Res. Manage.*, p. 13-19, 1987.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). *Guia do CEO sobre Água: Construindo negócios resilientes*. 2018. Disponível em: <https://www.wbcd.org/Programs/Food-and-Nature/Water/Resources/CEO-Guide-to-Water-building-resilient-business>. Acesso em: 10 jan. 2022.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). *Projeto Aqueduct*. 2014. Disponível em: <https://www.wri.org/aqueduct>. Acesso em: 10 jan. 2022.

WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT (WWDR). Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2017. *Águas residuais: o recurso inexplorado*. UNESCO World Water Assessment Programme, 2017.

WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT (WWDR). Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021. *O Valor Da Água*. UNESCO World Water Assessment Programme, 2021.

WEE, L. H.; MELEDINA, M.; TURNER, S.; CUSTERS, K.; KERKHOF, S.; SREE, S. P.; GOBECHIYA, E.; KIRSCHHOFF, C. E. A.; VAN TENDELOO, G.; MARTENS, J. A. Anatase TiO₂ nanoparticle coating on porous COK12 platelets as highly active and reusable photocatalysts. The Royal Society of Chemistry 2016, *RSC Adv.*, v. 6, p. 46678–46685, 2016.

YANG, Q.; XU, Q.; JIANG, H. L. Metal–organic frameworks meet metal nanoparticles: synergistic effect for enhanced catalysis. *Chemical Society Reviews*, v. 46, n. 15, p. 4774-4808, 2017.

YANG, T.; PENG, J.; ZHENG, Y.; HE, X.; HOU, Y.; WU, L.; FU, X. Enhanced photocatalytic ozonation degradation of organic pollutants by ZnO modified TiO₂ nanocomposites. *Applied Catalysis. B: Environmental*, v. 221, p. 223–234, 2018.

ZACKIEWICZ, M.; BONACELLI, M. B.; SALLES-FILHO, S. Estudos prospectivos e a organização de sistemas de inovação no Brasil. *São Paulo em Perspectiva*, v. 19, n. 1, p. 115-121, jan./mar. 2005.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. *Corantes: Caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento*. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016.

ZARBIN, A. J. G. Química de (nano)materiais. *Química Nova*, v. 30, n. 6, p. 1469-1479, 2007.

ZHANG, Y.; ROBINSON, D. K. R.; PORTER, A. L.; ZHU, D.; ZHANG, G.; LU, J. Technology roadmapping for competitive technical intelligence. *Technol Forecast Soc Chang*, v. 110, p. 175–186, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.029>. Acesso em: 04 jun. 2021.

ZHOU, P.; ZHANG, J.; ZHANG, Y.; ZHANG, G.; LI, W.; WEI, C.; SHU, S. Degradation of 2,4-dichlorophenol by activating persulfate and peroxomonosulfate using micron or nanoscale zero-valent copper. *Journal of Hazardous Materials*, v. 344, p. 1209–1219, 2018.

ZOLLINGER, H. *Color chemistry: syntheses, properties and applications of organic dyes pigments*. 3.ed. Zurich: Wiley, 2003.

360 RESEARCH REPORTS. *Global Nanocatalysts Market Growth 2022-2028*. SKU ID: LPI-19869709. Disponível em: <https://www.360researchreports.com/global-nanocatalysts-market-19869709>. Acesso em: 07 mai. 2022.

APÊNDICE A – ARTIGOS CIENTÍFICOS UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA PARA A PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Tabela 15 – Lista dos artigos científicos considerada para elaboração do *technology roadmap* (continua).

Título	Ano	País	Revista	Instituição
Study of polyvinyl alcohol-sio2 nanoparticles polymeric membrana in wastewater treatment containing zinc ions	2021	Romênia	Polymers	University Politehnica of Bucharest / National Institute for Research & Development in Chemistry and Petrochemistry— ICECHIM
LignoPhot: Conversion of hydrolysis lignin into the photoactive hybrid lignin/Bi4O5Br2/BiOBr composite for simultaneous dyes oxidation and Co2+ and Ni2+ recycling	2021	Suécia	Chemosphere	Stockholm University / KTH Royal Institute of <i>Technology</i>
Improving degradation of real wastewaters with self-heating magnetic nanocatalysts	2021	Espanha	Journal of Cleaner Production	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICMM/CSIC
Catalytically active membranas for decomposition of organic compounds in aqueous solutions	2021	Rússia	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	Mendeleev University of Chemical <i>Technology</i> of Russia
Mechanism and purification effect of photocatalytic wastewater treatment using graphene oxide-doped titanium dioxide composite nanomaterials	2021	China	Water (Switzerland)	Nanchang University
Influence of Ag nanoparticles anchored on protonated g-C3N4-Bi2MoO6nanocomposites for effective antibiotic and organic pollutant degradation	2021	Índia	RSC Advances	SRM Institute of Science and <i>Technology</i> , Kattankulathur, Chennai, Tamilnadu
Fe3O4-NPs/orange peel composite as magnetic heterogeneous Fenton-like catalyst towards high-efficiency degradation of methyl orange	2021	China	Water Science and <i>Technology</i>	Civil Aviation University of China (CAUC)
The nanoparticles zero-valent synthesis by black tea extract to remove rb 238 using synthetic and natural wastewater by packed bed reactor	2021	Iraque	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	University of <i>Technology</i> Iraq

Porous wood decorated with gold nanoparticles as flow-through membrana reactor for catalytic hydrogenation of methylene blue and 4-nitrophenol	2021	China	Cellulose	Guangxi University / Guangxi Bossco Environmental Protection <i>Technology Co, Ltd</i> (Empresa)
Tuning the photocatalytic/electrocatalytic properties of MoS ₂ /MoSe ₂ heterostructures by varying the weight ratios for enhanced wastewater treatment and hydrogen production	2021	Índia	RSC Advances	Thapar Institute of Engineering and <i>Technology</i>
A reusable chitosan/TiO ₂ @g-C ₃ N ₄ nanocomposite membrana for photocatalytic removal of multiple toxic water pollutants under visible light	2021	China	Water Science and <i>Technology</i>	Beijing University of Chemical <i>Technology</i>
Zn/S-modified Cu ₂ O nanoparticles for applications in photocatalysis	2021	China	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	Qingdao University of Science & <i>Technology</i> / Sichuan University of Science & Engineering
Experimental and physico-chemical comparison of zno nanoparticles' activity for photocatalytic applications in wastewater treatment	2021	Itália	Catalysts	University of Genoa
Facile one step green synthesis of iron nanoparticles using grape leaves extract: Textile dye decolorization and wastewater treatment	2021	Canadá	Water Science and <i>Technology</i>	Cape Breton University
Synthesis of ZnO nanoparticles using peels of Passiflora foetida and study of its activity as an efficient catalyst for the degradation of hazardous organic dye	2021	Índia	SN Applied Sciences	University of Mumbai
Engineering iron oxide nanocatalysts by a microwave-assisted polyol method for the magnetically induced degradation of organic pollutants	2021	Espanha	Nanomaterials	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICMM/CSIC
Green synthesis of Fe nanoparticles by using Mangifera indica extract and its application in photo-catalytic degradation of dyes	2021	Paquistão	Water Science and <i>Technology</i>	University of Agriculture Faisalabad, Faisalabad, Punjab
Enhanced photo-fenton removal efficiency with core-shell magnetic resin catalyst for textile dyeing wastewater treatment	2021	China	Water (Switzerland)	South China Normal University / Agile Environmental Protection Group, Yulin Xintao Environmental Protection <i>Technology Co., Ltd.</i>

Tailoring the effects of titanium dioxide (TiO ₂) and polyvinyl alcohol (pva) in the separation and antifouling performance of thin-film composite polyvinylidene fluoride (pvdf) membrana	2021	Austrália	Membranas	RMIT University
Biosynthesis of metallic nanoparticles from waste Passiflora edulis peels for their antibacterial effect and catalytic activity	2021	Vietnã	Arabian Journal of Chemistry	Tra Vinh University / Vietnam Academy of Science and <i>Technology</i>
Photocatalytic activity of cellulose acetate nanocerria/pt hybrid mats driven by visible light irradiation	2021	Itália	Polymers	Istituto Italiano di Tecnologia / Università Cattolica del Sacro Cuore
Microwave-assisted preparation of a silver nanoparticles/N-doped carbono dots nanocomposite and its application for catalytic reduction of rhodamine B, methyl red and 4-nitrophenol dyes	2021	Índia	RSC Advances	Palamuru University / BCMaterials, Basque Center for Materials, Applications and Nanostructures
Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Phoenix dactylifera waste as bioreductant for effective dye degradation and antibacterial performance in wastewater treatment	2021	Emirados Árabes Unidos	Journal of Hazardous Materials	Khalifa University
Impact of long-term storage of various redox-sensitive supported nanocomposites on their application in removal of dyes from wastewater: Mechanisms delineation through spectroscopic investigations	2021	Índia	Journal of Hazardous Materials	Indian Institute of Science Education and Research Kolkata
Silver nanoparticles for enhanced dye degradation	2021	Índia	Current Research in Green and Sustainable Chemistry	Noida Institute of Engineering and <i>Technology</i>
Hydrothermal and microwave synthesis of zns nanoparticles	2021	República Tcheca	NANOCON Conference Proceedings - International Conference on Nanomaterials	VŠB-Technical University of Ostrava
Characterization and photocatalytic activity of ZnO nanoflowers synthesized using Bridelia retusa leaf extract	2021	Índia	Applied Nanoscience (Switzerland)	Manipal Institute of <i>Technology</i>
Tuning the photoactivity of TiO ₂ nanoarchitectures doped with cerium or neodymium and application to colour removal from wastewaters	2021	Brasil	Environmental <i>Technology</i> (United Kingdom)	Universidade Federal de Santa Catarina / Instituto Nacional de Tecnologia

Enhanced photocatalytic activity of ZnO-graphene oxide nanocomposite by electron scavenging	2021	Estados Unidos	Catalysts	Central Michigan University
Synergistic photocatalytic activity of a combination of carbono nanotubes-graphene-nickel foam nanocomposites enhanced by dielectric barrier discharge plasma <i>technology</i> for water purification	2021	China	Water Science and <i>Technology</i>	Nantong University
Remediation of textile industry organic dye waste by photocatalysis using eggshell impregnated ZnO/CuO nanocomposite	2021	Etiópia	Water Science and <i>Technology</i>	Debre Berhan University
Green synthesis of ag-au bimetallic nanocomposites using waste tea leaves extract for degradation congo red and 4-nitrophenol	2021	Coréia do Sul	Sustainability (Switzerland)	Jeonbuk National University
Green superabsorbent nanocomposite hydrogels for high-efficiency adsorption and photo-degradation/reduction of toxic pollutants from waste water	2021	Egito	Polymer Testing	Egyptian Petroleum Research Institute
Photocatalytic and biological activity of ZnO nanoparticles using honey	2021	Índia	Coatings	Sadakathullah Appa College
Surface photosensitization of ZnO by ZnS to enhance the photodegradation efficiency for organic pollutants	2021	Índia	SN Applied Sciences	Institute of Nano Science and <i>Technology</i> / Panjab University
Photocatalytic degradation of Rhodamine B (RhB) dye in waste water and enzymatic inhibition study using cauliflower shaped ZnO nanoparticles synthesized by a novel One-pot green synthesis method	2021	Turquia	Arabian Journal of Chemistry	Bartın University
Corn bracts loading copper sulfide for rapid adsorption of Hg(II) and sequential efficient reuse as a photocatalyst	2021	China	Water Science and <i>Technology</i>	Ningde Normal University
Doping of Mg on ZnO Nanorods Demonstrated Improved Photocatalytic Degradation and Antimicrobial Potential with Molecular Docking Analysis	2021	Paquistão	Nanoscale Research Letters	Government College University
Enriched catalytic activity of TiO ₂ nanoparticles supported by activated carbono for noxious pollutant elimination	2021	Índia	Nanomaterials	Central University of Gujarat / Step-Up Jewels PVT. Ltd. Khatodara Gate

Hyaluronate macromolecules assist bioreduction (Au ^{III} to Au ⁰) and stabilization of catalytically active gold nanoparticles for azo contaminated wastewater treatment	2021	China	Environmental <i>Technology</i> and Innovation	Wuhan Textile University
Hydroponic cultured ginseng leaves zinc oxides nanocomposite stabilized with cmc polymer for degradation of hazardous dyes in wastewater treatment	2021	China	Materials	Chinese Academy of Agricultural Sciences / Kyung Hee University
La ₂ Sn ₂ O ₇ /g-C ₃ N ₄ nanocomposites: Rapid and green sonochemical fabrication and photo-degradation performance for removal of dye contaminations	2021	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Kashan
Solar light-induced methylene blue removal over TiO ₂ /AC composites and photocatalytic regeneration	2021	Portugal	Nanomaterials	Universidade do Porto / LNEC—National Laboratory for Civil Engineering
Structure and photocatalytic properties of TiO ₂ /Cu ₃ N composite films prepared by magnetron sputtering	2021	China	Materials Today Communications	Guilin University of <i>Technology</i>
Synergistic Photocatalytic-Adsorption Removal of Basic Magenta Effect of AgZnO/Polyoxometalates Nanocomposites	2021	China	Nanoscale Research Letters	Henan University
Visible-Light Driven Enhanced Photocatalytic Properties of rGO/Mn ₃ O ₄ /MoO ₃ Ternary Hybrid Nanocomposite	2021	Índia	ECS Journal of Solid State Science and <i>Technology</i>	Central University of Tamil Nadu
Photocatalytic nanocomposite polymer-tio ₂ membranas for pollutant removal from wastewater	2021	Argélia	Catalysts	Djillali Liabes University Sidi Bel Abbes / Unité de Développement des Équipements Solaires - Centre de Développement des Energies Renouvelables (UDES_CDÉR)
Synthesis, Characterization, and Evaluation of Degussa P25/Chitosan Composites for the Photocatalytic Removal of Sertraline and Acid Red 18 from Water	2021	Polónia	Journal of Polymers and the Environment	West Pomeranian University of <i>Technology</i> in Szczecin
Catalytic oxidation over nanostructured heterogeneous process as an effective tool for environmental remediation	2020	Egito	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Menoufia University / Nuclear Research Center, Atomic Energy Authority, Egypt

TiO ₂ /SiO ₂ /Fe ₃ O ₄ magnetic nanoparticles synthesis and application in methyl orange UV photocatalytic removal	2020	Irã	Water Science and Technology	Amirkabir University of Technology / Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)
Degradation of contaminants of emerging concern by electrochemical oxidation: Coupling of ultraviolet and ultrasound radiations	2020	Espanha	Materials	Universidad Politécnica de Madrid
Green synthesis of silver nanoparticles transformed synthetic textile dye into less toxic intermediate molecules through LC-MS analysis and treated the actual wastewater	2020	Paquistão	Environmental Research	Government College University
Biosynthesis and characterization of lead selenide semiconductor nanoparticles (PbSe NPs) and its antioxidant and photocatalytic activity	2020	China	Arabian Journal of Chemistry	Dalian University of Technology
Nanoparticles of FeNbO ₄ Produced by Microwave Assisted Combustion Reaction: a Potential Technology for the Treatment of Wastewater	2020	Brasil	Materials Research	Universidade Federal de Itajubá
Immobilizing a visible light-responsive photocatalyst on a recyclable polymeric composite for floating and suspended applications in water treatment	2020	China	RSC Advances	Shantou University / Guangdong Guangye Environmental Protection Industrial Group Co., Ltd.
Kinetic studies on the catalytic degradation of rhodamine b by hydrogen peroxide: Effect of surfactant coated and non-coated iron (III) oxide nanoparticles	2020	Índia	Polymers	Aligarh Muslim University
Dye wastewater treatment enabled by piezo-enhanced photocatalysis of single-component ZnO nanoparticles	2020	Tailândia	RSC Advances	Chiang Mai University
Ag/ZnO/PMMA nanocomposites for efficient water reuse	2020	Itália	ACS Applied Bio Materials	CNR Italy / University of Malta / Plastica Alfa SpA
Highly efficient flow-through catalytic reduction of methylene blue using silver nanoparticles functionalized cotton	2020	China	Chemical Engineering Journal	Chinese Academy of Sciences
A unique ZnFe ₂ O ₄ /graphene nanoplatelets nanocomposite for electrochemical energy storage and efficient visible light driven catalysis for the degradation of organic noxious in wastewater	2020	Paquistão	Journal of Physics and Chemistry of Solids	Quaid-i-Azam University
Defect-induced nucleation and epitaxial growth of a MOF-derived hierarchical Mo ₂ C@Co architecture for an efficient hydrogen evolution reaction	2020	China	RSC Advances	Shenzhen University

Synergetic treatment of dye contaminated wastewater using microparticles functionalized with carbon nanotubes/titanium dioxide nanocomposites	2020	China	RSC Advances	University of Nottingham Ningbo China / ECO Environmental Investment Limited
TiO ₂ nanofibres decorated with green-synthesized PAu/Ag@CQDs for the efficient photocatalytic degradation of organic dyes and pharmaceutical drugs	2020	Índia	RSC Advances	Academy of Scientific and Innovative Research / Council of Scientific & Industrial Research (CSIR)
MnFe ₂ O ₄ /ZrO ₂ nanocomposite as an efficient magnetically separable photocatalyst with good response to sunlight: preparation, characterization and catalytic mechanism	2020	Índia	SN Applied Sciences	East West Institute of <i>Technology</i>
Sonochemical synthesis, characterization and application of PrVO ₄ nanostructures as an effective photocatalyst for discoloration of organic dye contaminants in wastewater	2020	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Kashan
Synthesis, characterization and photo-catalytic activity of guar-gum-: G -alginat@silver bionanocomposite material	2020	Índia	RSC Advances	Chandigarh University
Modeling and optimization of Photocatalytic Decolorization of binary dye solution using graphite electrode modified with Graphene oxide and TiO ₂ O ₃ Chemical Sciences 0306 Physical Chemistry (incl. Structural)	2020	Irã	Journal of Environmental Health Science and Engineering	Amirkabir University of <i>Technology</i>
Accelerated separation of photogenerated charge carriers and enhanced photocatalytic performance of g-C ₃ N ₄ by Bi ₂ S ₃ nanoparticles	2020	China	Chinese Journal of Catalysis	China University of Geosciences Beijing
Simultaneously enhanced photocatalytic and antibacterial activities of TiO ₂ /Ag composite nanofibers for wastewater purification	2020	China	Journal of Environmental Chemical Engineering	Chinese Academy of Sciences / Agro- Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture
Synthesis of immobilized ZnO over polyurethane and photocatalytic activity evaluation for the degradation of azo dye under UV and solar light irradiation	2020	Paquistão	Materials Research Express	University of Agriculture Faisalabad
Hydrodynamic cavitation degradation of Rhodamine B assisted by Fe ³⁺ -doped TiO ₂ : Mechanisms, geometric and operation parameters	2020	China	Ultrasonics Sonochemistry	Liaoning University

Effect of surfactant SDS on the morphology and photocatalytic performance of Zn ₂ GeO ₄ nanorods	2020	China	Materials Research Express	Southwest University
Effective photocatalytic degradation and physical adsorption of methylene blue using cellulose/GO/TiO ₂ hydrogels	2020	China	RSC Advances	South China University of Technology
Surfactant-modified titania for cadmium removal and textile effluent treatment together being environmentally safe for seed germination and growth of <i>Vigna radiata</i>	2020	Índia	Environmental Science and Pollution Research	TERI School of Advanced Studies / The Energy and Resources Institute (TERI)
Turning waste into useful products by photocatalysis with nanocrystalline tio ₂ thin films: Reductive cleavage of azo bond in the presence of aqueous formate	2020	Itália	Nanomaterials	Università di Ferrara
A new technique for the synthesis of lanthanum substituted nickel cobaltite nanocomposites for the photocatalytic degradation of organic dyes in wastewater	2020	Paquistão	Arabian Journal of Chemistry	University of the Punjab
Effect of the morphology of tungsten oxide embedded in sodium alginate/polyvinylpyrrolidone composite beads on the photocatalytic degradation of methylene blue dye solution	2020	Egito	Materials	City of Scientific Research and Technological Applications
BiOCl-Bi ₁₂ O ₁₇ Cl ₂ nanocomposite with high visible-light photocatalytic activity prepared by an ultrasonic hydrothermal method for removing dye and pharmaceutical	2020	China	Chinese Journal of Catalysis	Renmin University of China
Tungsten oxide modified with carbono nanodots: Integrating adsorptive and photocatalytic functionalities for water remediation	2020	Índia	Journal of Science: Advanced Materials and Devices	M S Ramaiah Institute of Technology
Magnetically separable ZnO/ZnFe ₂ O ₄ and ZnO/CoFe ₂ O ₄ photocatalysts supported onto nitrogen doped graphene for photocatalytic degradation of toxic dyes	2020	Índia	Arabian Journal of Chemistry	Shoolini University
Performance of tight ultrafiltration membrana in textile wastewater treatment via MPR system: Effect of pressure on membrana fouling	2020	Malásia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Universiti Tun Hussein Onn Malaysia

Polymer Brushes on Graphitic Carbon Nitride for Patterning and as a SERS Active Sensing Layer via Incorporated Nanoparticles	2020	Alemanha	ACS Applied Materials and Interfaces	Technische Universität Dresden / Leibniz Institute of Polymer Research Dresden e.V.
Polyvinylidene fluoride membrana funcionalized with zero valent iron for highly efficient degradation of organic contaminants	2020	China	Separation and Purification <i>Technology</i>	Guangzhou University
Porous ceramic supported TiO ₂ nanoparticles: Enhanced photocatalytic activity for Rhodamine B degradation [Nanopartículas de TiO ₂ suportadas en cerámica porosa: Actividad fotocatalítica mejorada para el tratamiento de la rodamina B]	2020	Brasil	Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio	Universidade do Rio Grande do Sul
Visible light driven photocatalytic nanocomposite for the degradation of Rhodamine B in water	2020	México	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias / Centro de Investigación en Materiales Avanzados
Peroxymonosulfate (PMS) activation on cobalt-doped TiO ₂ nanotubes: degradation of organics under dark and solar light irradiation conditions	2020	Estados Unidos	Environmental Science: Nano	California Institute of <i>Technology</i>
Exploration of dye degradation potential of eco-friendly synthesized TiO ₂ nanoparticles using extract of acacia nilotica	2019	Paquistão	Pakistan Journal of Analytical and Environmental Chemistry	Mehran University of Engineering & <i>Technology</i>
A two-step strategy for high-efficiency fluorescent dye removal from wastewater	2019	China	npj Clean Water	University of Science and <i>Technology</i> Beijing
Sonochemical synthesis of Pr ₆ MoO ₁₂ nanostructures as an effective photocatalyst for wastewater treatment	2019	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Kashan
Silver embedded C-TiO ₂ exhibits improved photocatalytic properties with potential application in waste water treatment	2019	Arábia Saudita	Arabian Journal of Chemistry	Imam Abdulrahman Bin Faisal University
Sonochemical-assisted synthesis of pure Dy ₂ ZnMnO ₆ nanoparticles as a novel double perovskite and study of photocatalytic performance for wastewater treatment	2019	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Kashan
In Situ Synthesis and Photocatalytic Properties of Titanium Dioxide Nanoparticles on Cotton Fabrics	2019	China	Water, Air, and Soil Pollution	Taiyuan University of <i>Technology</i>

Sonophotocatalytic degradation mechanisms of Rhodamine B dye via radicals generation by micro- and nano-particles of ZnO	2019	Itália	Applied Catalysis B: Environmental	Politecnico di Torino / Istituto Italiano di Tecnologia
Microwaved assisted synthesis Ag ₂ O/TiO ₂ /CeO ₂ for highly efficient photocatalyst	2019	Indonésia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Universitas Indonesia
Synthesis of CaWO ₄ -biochar nanocomposites for organic dye removal	2019	Estados Unidos	Materials Research Bulletin	Jackson State University
TiO ₂ -nanoparticles Coated Forward Osmosis Membranas for Enhanced Filtration of Textile Effluent	2019	Tailândia	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	Chulalongkorn University
Facile development and structural investigations of HAp and HAp/Ta nanostructures: Photocatalytic activity against Turq blue GL dye	2019	China	Materials Research Express	Jiangsu University of Science and <i>Technology</i>
Synthesis of Z-scheme Mn-CdS/MoS ₂ /TiO ₂ ternary photocatalysts for high-efficiency sunlight-driven photocatalysis	2019	China	Advanced Composites Letters	Hunan University of Arts and Science
Centella asiatica phenolic extract-mediated bio-fabrication of silver nanoparticles: Characterization, reduction of industrially relevant dyes in water and antimicrobial activities against foodborne pathogens	2019	Nigéria	RSC Advances	Joseph Ayo Babalola University
Decolorization of Reactive black-5 Dye by UV based photocatalytic with immobilized ZnO nanoparticles onto ceramic plate surface	2019	Indonésia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Bandung Institute of <i>Technology</i>
Removal of the commercial reactive dye Procion Blue MX-7RX from real textile wastewater using the synthesized Fe ₂ O ₃ nanoparticles at different particle sizes as a source of Fenton's reagent	2019	Egito	Nanoscale Advances	Menoufia University
Visible light-active CdS/TiO ₂ hybrid nanoparticles immobilized on polyacrylonitrile membranas for the photodegradation of dyes in water	2019	África do Sul	Journal of Nanotechnology	Vaal University of <i>Technology</i>

Application of ZnO-Ag-Nd nanocomposite as a new synthesized nanophotocatalyst for the degradation of organic compounds: kinetic, thermodynamic and economic study	2019	Irã	Toxicology and Industrial Health	Islamic Azad University / Institute for Color Science and <i>Technology</i>
Synergy of photocatalysis and adsorption for simultaneous removal of hexavalent chromium and methylene blue by g-C ₃ N ₄ /BiFeO ₃ /carbono nanotubes ternary composites	2019	China	International Journal of Environmental Research and Public Health	Central South University of Forestry and <i>Technology</i>
The synthesis of Co: XNi _{1-x} Fe ₂ O ₄ /multi-walled carbono nanotube nanocomposites and their photocatalytic performance	2019	China	RSC Advances	Northeast Electric Power University
A Ternary Magnetic Recyclable ZnO/Fe ₃ O ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalyst for Efficient Photodegradation of Monoazo Dye	2019	China	Nanoscale Research Letters	Xi'an Polytechnic University
Dye degrading and fouling-resistant membranas formed by deposition with ternary nanocomposites of N-doped graphene/TiO ₂ /activated carbono	2019	China	Membranas	Zhejiang University of <i>Technology</i>
Sunlight active U ₃ O ₈ @ZnO nanocomposite superfast photocatalyst: Synthesis, characterization and application	2019	Sri Lanka	Nanoscale Advances	University of Peradeniya / Sri Lanka Institute of <i>Nanotechnology</i>
Highly efficient removal of crystal violet dye from water by MnO ₂ based nanofibrous mesh/photocatalytic process	2019	Paquistão	Journal of Materials Research and <i>Technology</i>	University of Agriculture Faisalabad / National Institute for <i>Biotechnology</i> and Genetic Engineering
Investigations on amphoteric chitosan/TiO ₂ bionanocomposites for application in visible light induced photocatalytic degradation	2019	Índia	Advances in Polymer <i>Technology</i>	Deemed University
Photocatalytic microporous membrana against the increasing problem of water emerging pollutants	2019	Portugal	Materials	University of Minho / International Iberian <i>Nanotechnology</i> Laboratory
Industrial textile effluent treatment and antibacterial effectiveness of Zea mays L. Dry husk mediated bio-synthesized copper oxide nanoparticles	2019	África do Sul	Journal of Hazardous Materials	University of South Africa / Nanosciences African Network (NANOAFNET), iThemba LABS-National Research Foundation
Control sonochemical parameter to prepare pure Zn _{0.35} Fe _{2.65} O ₄ nanostructures and study their photocatalytic activity	2019	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Kashan

Cost effective green synthesis of NiO nanostructures as highly efficient photocatalysts for degradation of organic dyes	2019	Paquistão	Micro and Nano Letters	Hazara University
Sonochemical-assisted route for synthesis of spherical shaped holmium vanadate nanocatalyst for polluted waste water treatment	2019	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Kashan
UV-vis light induced photocatalytic activity of TiO ₂ /graphene oxide nanocomposite coatings	2019	Romênia	Catalysis Today	National Institute for Lasers, Plasma and Radiation Physics / Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Photocatalytic activity enhanced by photo-thermal conversion with recyclable hollow Fe ₃ O ₄ @TiO ₂ nanoparticles	2019	China	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Harbin Institute of Technology
Ag-TON nanospheres coupled with fly ash cenospheres for wastewater treatment under visible light irradiation	2018	China	Water Science and Technology	Taiyuan University of Technology
Photocatalytic degradation of methylene blue by ZnO/NiFe ₂ O ₄ nanoparticles	2018	Nigéria	Applied Surface Science	Osun State University
Novel photocatalytic PVDF/Nano-TiO ₂ hollow fibers for Environmental remediation	2018	Itália	Polymers	Institute on Membrana Technology, ITM-CNR
Anatase TiO ₂ Nanoparticles: Facile Synthesis via Non-aqueous Precipitation and Photocatalytic Property	2018	China	Wuji Cailiao Xuebao/Journal of Inorganic Materials	Chinese Academy of Sciences
Photocatalytic removal of carcinogenic reactive red S3B dye by using ZnO and Cu doped ZnO nanoparticles synthesized by polyol method: A kinetic study	2018	Paquistão	Solar Energy	Mirpur University of Science and Technology (MUST)
Tunable photocatalytic selectivity of TiO ₂ /SiO ₂ nanocomposites: Effect of silica and isolation approach	2018	Austrália	Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects	Deakin University
Tough and self-healable nanocomposite hydrogels for repeatable water treatment	2018	Estados Unidos	Polymers	University of Southern California
Preparation of Heat Treated Titanium Dioxide (TiO ₂) Nanoparticles for Water Purification	2018	Malásia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Universiti Malaysia Perlis

Au nanoparticles (nps) surface plasmon resonance enhanced photocatalytic activities of au/bi ₂ wo ₆ heterogeneous nanostructures	2018	China	Wuji Cailiao Xuebao/Journal of Inorganic Materials	Yan'an University
Catalytically Active Bacterial Nanocellulose-Based Ultrafiltration Membrana	2018	China	Small	Donghua University
Enhanced removal of basic violet 10 by heterogeneous sono-Fenton process using magnetite nanoparticles	2018	Turquia	Ultrasonics Sonochemistry	Near East University
Wastewater Treatment from Batik Industries Using TiO ₂ Nanoparticles	2018	Indonésia	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	Diponegoro University
Synthesis of ZnWO ₄ /Ag ₃ PO ₄ p-n heterojunction photocatalyst and enhanced visible-light photocatalytic applications	2018	China	Water Science and <i>Technology</i>	Chang'an University
The photocatalytic degradation of methylene blue by green semiconductor films that is induced by irradiation by a light-emitting diode and visible light	2018	China	Journal of the Air and Waste Management Association	National Chi Nan University
Rapid Photocatalytic Degradation of Pollutant from Water under UV and Sunlight via Cellulose Nanofiber Aerogel Wrapped by TiO ₂	2018	China	Journal of Nanomaterials	Central South University of Forestry and <i>Technology</i>
Hierarchical heterostructures of Bi ₂ MoO ₆ microflowers decorated with Ag ₂ CO ₃ nanoparticles for efficient visible-light-driven photocatalytic removal of toxic pollutants	2018	China	Beilstein Journal of Nanotechnology	Zhejiang Ocean University
Photocatalytic degradation of industrial dye wastewater using zinc oxide-polyvinylpyrrolidone nanoparticles [Penguraian fotopemangkinan air sisa pewarna industri menggunakan nanopartikel zink oksida-polivinilpirolidon]	2018	Malásia	Malaysian Journal of Analytical Sciences	Universiti Tun Hussein Onn Malaysia
Synthesis of a MnO ₂ /Fe ₃ O ₄ /diatomite nanocomposite as an efficient heterogeneous Fenton-like catalyst for methylene blue degradation	2018	China	Beilstein Journal of Nanotechnology	Central South University

Structural effects on the catalytic activity of carbon-supported magnetite nanocomposites in heterogeneous Fenton-like reactions	2018	China	RSC Advances	Peking University
Photocatalytic degradation of rhodamine B catalyzed by TiO ₂ films on a capillary column	2018	China	RSC Advances	Beijing University of Chemical <i>Technology</i>
Self-assembled AgNP-containing nanocomposites constructed by electrospinning as efficient dye photocatalyst materials for wastewater treatment	2018	China	Nanomaterials	Yanshan University
Ag nanoparticles deposited on oxygen-vacancy-containing BiVO ₄ for enhanced near-infrared photocatalytic activity	2018	China	Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis	Dalian Polytechnic University
Synthesis and characterization of graphene oxide sheets integrated with gold nanoparticles and their applications to adsorptive removal and catalytic reduction of water contaminants	2018	Paquistão	RSC Advances	Quaid-i-Azam University
Synthesis of PEDOT/ZnO photocatalyst: Validation of photocatalytic activity by degradation of azo RR45 dye under solar and UV-A irradiation	2018	Croácia	Chemical and Biochemical Engineering Quarterly	University of Zagreb
Facile surface modification of nickel ferrite nanoparticles for inherent multiple fluorescence and catalytic activities	2018	Índia	RSC Advances	S. N. Bose National Centre for Basic Sciences / Indian Institute of Science Education and Research Bhopal
Preparation and characterization of macroalgae biochar nanomaterials with highly efficient adsorption and photodegradation ability	2018	China	Materials	Zhejiang Ocean University
Sono-coprecipitation synthesis and physicochemical characterization of CdO-ZnO nanophotocatalyst for removal of acid orange 7 from wastewater	2018	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	Sahand University of <i>Technology</i>
Sonochemical synthesis of WS ₂ nanosheets and its application in sonocatalytic removal of organic dyes from water solution	2018	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Tabriz
Synthesis of 2D boron nitride doped polyaniline hybrid nanocomposites for photocatalytic degradation of	2018	Malásia	Arabian Journal of Chemistry	Sunway University

carcinogenic dyes from aqueous solution				
Visible light photocatalytic degradation of azo dye and a real textile wastewater using Mn, Mo, La/TiO ₂ /ac nanocomposite	2018	Irã	Chemical and Biochemical Engineering Quarterly	Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences
Stabilized fabrication of anatase-TiO ₂ /FeS ₂ (pyrite) semiconductor composite nanocrystals for enhanced solar light-mediated photocatalytic degradation of methylene blue	2018	Paquistão	RSC Advances	Quaid-i-Azam University
Fabrication of magnetically separable NiFe ₂ O ₄ /BiOI nanocomposites with enhanced photocatalytic performance under visible-light irradiation	2018	China	RSC Advances	Jiangsu University of <i>Technology</i>
Construction of flower-like MoS ₂ /Fe ₃ O ₄ /rGO composite with enhanced photo-Fenton like catalyst performance	2018	China	RSC Advances	Jilin Institute of Chemical <i>Technology</i>
Synthesis, characterization and sonocatalytic applications of nano-structured carbon based TiO ₂ catalysts	2018	Coréia do Sul	Ultrasonics Sonochemistry	Korea University / Korea Environmental Industry and <i>Technology</i>
Preparation and performance of Cu ₂ O/TiO ₂ nanocomposite thin film and photocatalytic degradation of Rhodamine B	2018	China	Water Science and <i>Technology</i>	Xi'an University of <i>Technology</i>
ZnO/ZrO ₂ nanocomposite: Sonosynthesis, characterization and its application for wastewater treatment	2018	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	Islamic Azad University
Synthesis of well-aligned CuO nanowire array integrated with nanoporous CuO network for oxidative degradation of methylene blue	2017	China	Corrosion Science	The Hong Kong Polytechnic University
Increasing the efficiency of magnetic heterogeneous Fenton catalysts with a simple halogen visible lamp	2017	Argélia	Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry	Université du 20 Août 1955 de Skikda
Sonochemical fabrication of Ag ₂ CO ₃ nanomaterial and influencing factors on photocatalytic properties	2017	China	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Xinjiang University
Enhancing Photocatalytic Degradation of Methyl Blue Using PVP-Capped and Uncapped CdSe Nanoparticles	2017	África do Sul	Journal of Nanotechnology	Vaal University of <i>Technology</i>

Multiwalled carbon nanotube-supported CuCo ₂ S ₄ as a heterogeneous Fenton-like catalyst with enhanced performance	2017	China	RSC Advances	Chinese Academy of Sciences / Chinese Academy of Geological Sciences
Photocatalytic degradation of methyl orange, methylene blue and rhodamine B with AgCl nanocatalyst synthesised from its bulk material in the ionic liquid [P6 6 6 14]Cl	2017	Espanha	Water Science and Technology	University of Santiago de Compostela
Controlled synthesis and wastewater treatment of Ag ₂ O/TiO ₂ modified chitosan-based photocatalytic film	2017	China	RSC Advances	Beijing University of Chemical Technology
Plasmon induced enhanced photocatalytic activity of gold loaded hydroxyapatite nanoparticles for methylene blue degradation under visible light	2017	México	RSC Advances	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)
Solar photocatalytically active, engineered silver nanoparticle synthesis using aqueous extract of mesocarp of Cocos nucifera (Red Spicata Dwarf)	2017	Índia	Journal of Experimental Nanoscience	National Institute of Technology Karnataka Surathka
Quantitative immobilization of phthalocyanine onto bacterial cellulose for construction of a high-performance catalytic membrana reactor	2017	China	Materials	Hangzhou Normal University
A cost-effective birnessite-silicon solar cell hybrid system with enhanced performance for dye decolorization	2017	China	RSC Advances	Peking University
Detection of oxygen species generated from Ag ₂ Se-graphene heterojunction photocatalysts with excellent visible light driven photocatalytic performance	2017	China	Korean Journal of Materials Research	Suzhou University of Science and Technology
Renewable hybrid nanocatalyst from magnetite and cellulose for treatment of textile effluents	2017	Brasil	Carbohydrate Polymers	Universidade Federal de Lavras / Bioproducts Research Unit
FeII/FeIII Doped Bi/BiOBr Hierarchical Microspheres as a Highly Efficient Catalyst for Degradation of Organic Contaminants at Neutral pH: The Role of Visible Light and H ₂ O ₂	2017	China	ChemCatChem	Chinese Academy of Sciences
Novel Solar Photocatalytic Reactor for Wastewater Treatment	2017	Indonésia	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Bandung Institute of Technology

A facile co-precipitation synthesis of heterostructured ZrO ₂ /ZnO nanoparticles as efficient photocatalysts for wastewater treatment	2017	Espanha	Journal of Materials Science	Universitat Autònoma de Barcelona / Surface Engineering Area, IK4-CIDETEC
Experimental study and artificial neural network modeling of tartrazine removal by photocatalytic process under solar light	2017	Argélia	Water Science and <i>Technology</i>	Ecole Nationale Polytechnique / Unité de Développement des Équipements Solaires - Centre de Développement des Energies Renouvelables (UDES_CDER)
Facile Fabrication of Bi ₂ WO ₆ /Ag ₂ S Heterostructure with Enhanced Visible-Light-Driven Photocatalytic Performances	2016	China	Nanoscale Research Letters	Liaocheng University
Fast degradation of dyes in water using manganese-oxide-coated diatomite for environmental remediation	2016	Vietnã	Journal of Physics and Chemistry of Solids	Hanoi University of Science and <i>Technology</i>
Laccase immobilization on poly(p-phenylenediamine)/Fe ₃ O ₄ nanocomposite for reactive blue 19 dye removal	2016	China	Applied Sciences (Switzerland)	Xinxiang Medical University
Enhanced ultrasound-assisted degradation of methyl orange and metronidazole by rectorite-supported nanoscale zero-valent iron	2016	China	Ultrasonics Sonochemistry	Wuhan Institute of <i>Technology</i>
Optimization of Reactive Blue 21 removal by Nanoscale Zero-Valent Iron using response surface methodology	2016	Irã	Arabian Journal of Chemistry	Islamic Azad University
Preparation, photocatalytic property and antibacterial property of Ag@TiO ₂ @SiO ₂ composite nanomaterials	2016	China	Wuji Cailiao Xuebao/Journal of Inorganic Materials	Xi'an University of Architecture and <i>Technology</i>
Synthesis, characteristics and sonocatalytic activities of calcined γ -Fe ₂ O ₃ and TiO ₂ nanotubes/ γ -Fe ₂ O ₃ magnetic catalysts in the degradation of Orange G	2016	Malásia	Ultrasonics Sonochemistry	Universiti Tunku Abdul Rahman
Nanocrystals for the degradation of a pollutant dye [Nanocristais para a degradação de um corante poluente] [Nanocristales para degradación de un colorante contaminante]	2016	Colômbia	Revista Colombiana de Química	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Control of selectivity in heterogeneous photocatalysis by tuning TiO ₂ morphology for water treatment applications	2016	Egito	Nanomaterials and Nanotechnology	Beni-Suef University

Anatase TiO ₂ nanoparticle coating on porous COK-12 platelets as highly active and reusable photocatalysts	2016	Bélgica	RSC Advances	KU Leuven
Modified Sol-Gel Synthesis of Carbon Nanotubes Supported Titania Composites with Enhanced Visible Light Induced Photocatalytic Activity	2016	China	Journal of Nanomaterials	Yantai University
Treatment of textile wastewater in the fenton process in the presence of iron and nickel nanocompounds	2016	Polónia	Fibres and Textiles in Eastern Europe	Textile Research Institute
Using TiO ₂ Mesoflower Interlayer in Tubular Porous Titanium Membranes for Enhanced Electrocatalytic Filtration	2016	China	Electrochimica Acta	Chinese Academy of Sciences / Korea Institute of Science and Technology (KIST)
Hybrid nanocomposites with enhanced visible light photocatalytic ability for next generation of clean energy systems	2016	Estados Unidos	Applied Catalysis A: General	West Virginia University
Enhanced photocatalytic properties of reusable TiO ₂ -loaded natural porous minerals in dye wastewater purification	2016	China	Powder Technology	Chinese Academy of Sciences
Degradation of refractory pollutants under solar light irradiation by a robust and self-protected ZnO/CdS/TiO ₂ hybrid photocatalyst	2016	China	Water Research	University of Science & Technology of China
Sonocatalytic decolorization of textile wastewater using synthesized γ -FeOOH nanoparticles	2015	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Tabriz
Effect of Ag doping on structural, optical, and photocatalytic properties of ZnO nanoparticles	2015	Irã	Journal of Alloys and Compounds	Isfahan University of Technology
Photocatalytic activity of mesoporous microbricks of ZnO nanoparticles prepared by the thermal decomposition of bis(2-aminonicotinato) zinc (II)	2015	Irã	Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis	Iran University of Science and Technology
Synthesis of nanocrystalline titanium dioxide for photodegradation treatment of remazol brown dye	2015	Índia	Applied Nanoscience (Switzerland)	Alagappa University
Photocatalytic Properties of Sisal Fiber Coated with Nano Titanium Dioxide	2015	Brasil	Materials Today: Proceedings	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Microwave-ultrasound assisted synthesis of β -FeOOH and its catalytic property in a photo-Fenton-like process	2015	China	Ultrasonics Sonochemistry	Nanjing Agricultural University

A Facile Low-Temperature Hydrothermal Method to Prepare Anatase Titania/Cellulose Aerogels with Strong Photocatalytic Activities for Rhodamine B and Methyl Orange Degradations	2015	China	Journal of Nanomaterials	Northeast Forestry University / Chinese Academy of Forestry
Catalytic reductive degradation of methyl orange using air resilient copper nanostructures	2015	Paquistão	Journal of Nanomaterials	University of Sindh
Palladium nanoparticles produced and dispersed by Caldicellulosiruptor saccharolyticus enhance the degradation of contaminants in water	2015	China	RSC Advances	University of Science and Technology of China
Enhanced decolorization of methyl orange using zero-valent copper nanoparticles under assistance of hydrodynamic cavitation	2015	China	Ultrasonics Sonochemistry	Tongji University
Impact of ultrasonic dispersion on the photocatalytic activity of titania aggregates	2015	Alemanha	Beilstein Journal of Nanotechnology	Technische Universität Dresden
Application of plasma-sprayed TiO ₂ coatings for industrial (tannery) wastewater treatment	2015	Espanha	Ceramics International	Universitat Jaume I / Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV), CSIC / Leitat Technological Center
Sonocatalytic removal of an organic dye using TiO ₂ /Montmorillonite nanocomposite	2015	Irã	Ultrasonics Sonochemistry	University of Tabriz
Preparation of TiO ₂ /Fe ₂ O ₃ /chitosan nanocomposite films and its photocatalytic degradation of Rhodamine B	2015	China	Asian Journal of Chemistry	Binzhou University
Photocatalytic effects of wool fibers modified with solely TiO ₂ nanoparticles and N-doped TiO ₂ nanoparticles by using hydrothermal method	2014	China	Chemical Engineering Journal	Xi'an Polytechnic University
Bifuncional core-shell nanocomposite Mn-doped ZnO/Fe ₃ O ₄ for photodegradation of reactive blue 198 dye	2014	Vietnã	Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology	Industrial University of HoChiMinh City
Microwave synthesis of magnetically separable ZnFe ₂ O ₄ -reduced graphene oxide for wastewater treatment	2014	Malásia	Ceramics International	Universiti Putra Malaysia
RhB Adsorption Performance of Magnetic Adsorbent Fe ₃ O ₄ /RGO Composite and Its Regeneration through A Fenton-like Reaction	2014	China	Nano-Micro Letters	Shanghai Jiao Tong University

Enhanced photocatalytic performance of NiO-decorated ZnO nanowhiskers for methylene blue degradation	2014	Malásia	Journal of Nanotechnology	Universiti Kebangsaan Malaysia
Sonocatalytic degradation of rhodamine B in the presence of TiO ₂ nanoparticles by loading WO ₃	2014	China	Korean Journal of Materials Research	Suzhou University of Science and Technology
Enhanced photocatalytic activity of W-doped and W-La-codoped TiO ₂ nanomaterials under simulated sunlight	2014	China	Journal of Nanomaterials	Dalian Polytechnic University
ZnO nanostructures on electrospun nanofibers by atomic layer deposition/hydrothermal growth and their photocatalytic activity	2014	Turquia	Materials Research Society Symposium Proceedings	Bilkent University
Graphene-enhanced visible-light photocatalysis of large-sized CdS particles for wastewater treatment	2014	China	Nanoscale Research Letters	Changchun University of Technology
Synthesis of molecularly imprinted polypyrrole/titanium dioxide nanocomposites and its selective photocatalytic degradation of rhodamine B under visible light irradiation	2014	China	Express Polymer Letters	Jiangsu University
Microwave-assisted degradation of acid orange using a conjugated polymer, polyaniline, as catalyst	2014	Índia	Arabian Journal of Chemistry	Jamia Millia Islamia (A Central University)
Effective ultrasound electrochemical degradation of methylene blue wastewater using a nanocoated electrode	2014	China	Ultrasonics Sonochemistry	Tsinghua University
Structural, morphological and photocatalytic characterisations of Ag-coated anatase TiO ₂ fabricated by the sol-gel dip-coating method	2013	Irã	Journal of Experimental Nanoscience	University of Kashan
TiO ₂ nanoparticles-coated polypropylene copolymer as photocatalyst on methylene blue photodegradation under solar exposure	2012	Indonésia	American Journal of Environmental Sciences	Bandung Institute of Technology
Polymer-inorganic core-shell nanofibers by electrospinning and atomic layer deposition: Flexible nylon-ZnO core-shell nanofiber mats and their photocatalytic activity	2012	Turquia	ACS Applied Materials and Interfaces	Bilkent University

Fonte: A autora, 2022.

APÊNDICE B – Patentes concedidas utilizadas como referência para a prospecção tecnológica

Tabela 16 - Lista das patentes concedidas considerada para elaboração do *technology roadmap* (continua).

Número	Título	Ano	País	Cessionário
CN108579817A	Preparation method of high-catalytic-activity material for heterogeneous Fenton reactions	2018	China	Qingyuan Yuelyu New Material Tech Co., Ltd.
CN105817241A	Method for preparing copper phosphotungstate@titanium dioxide core-shell structured nanomaterial	2016	China	Bohai University
CN105214664A	Copper-doped Fe ₃ O ₄ magnetic composite nanomaterial as well as preparation method and application thereof	2016	China	Wuhan Institute of Technology
CN104624222A	Method for preparing Cu ₂ O/zeolite nanocomposite material for treating dye wastewater	2015	China	Tianjin Chengjian University
US20190366308	Composition and method for treating dye wastewater	2019	Irã	Firouzeh Siadatnasab, Saeed Farhadi e Akram-Alsadat Hoseini
US20200247698	Water treatment system and methods thereof	2020	Arábia Saudita	King Abdulaziz University
US20210087072	Eco-friendly approach to α-Fe ₂ O ₃ as multifunctional green material for water treatment (or "α-Fe ₂ O ₃ nanoparticles and method of making and use thereof in photodegradation of organic pollutants, as a photocatalyst and as an antibacterial composition")	2021	Arábia Saudita	Imam Abdulrahman Bin Faisal University
US20200346940	ZnO-porous graphite composites, their use and manufacture	2020	Arábia Saudita	Imam Abdulrahman Bin Faisal University
US20190127883	Iodine doped bismuthyl carbonatoe nanosheet and molybdenum disulfide modified carbon nano fiber composites, preparation method and application thereof	2019	China	Soochow University
US20200346187	Titania-carbon dot-reduced graphene oxide composites, their make, and use	2020	Arábia Saudita	Imam Abdulrahman Bin Faisal University

US20190193061	Method for preparing laminar zinc hydroxide organic-inorganic nanocomposites for use in the removal and degradation of dyes from textile effluents	2019	Chile	Universidad de Chile
US20190126257	Hollow porous carbon nitride nanospheres composite loaded with agbr nanoparticles, preparation method thereof, and its application in dye degradation	2019	China	Soochow University
US20160045874	Nanocomposite membranas with advanced antifouling properties under visible light irradiation	2016	Estados Unidos	Baolin Deng
IN201611025631	Enhanced photocatalytic applications of novel green composites of semiconductor bismuth oxyhalides (bioxs)	2018	Índia	Amity University
EG29818	Magneto nano wastewater treatment	2020	Egito	Yasser Abdul Motalib Abdul Hady Abdul Motalib
US10793684	Method of reducing an organic pollutant in contaminated water	2020	Arábia Saudita	King Abdulaziz University
IN201711018838	Nanocomposite photocatalysts	2018	Índia	Indian Institute of Technology Delhi
US20150315048	Material used in the removal of contaminants from liquid matrices	2015	Colombia	Universidad Industrial de Santander
US20140077425	Porous metal oxide and metal oxide-organic nanocomposites, methods of making and uses thereof	2014	Estados Unidos	The Regents of The University of California
US10882029	Graphene oxide and cobalt tin oxide nanocomposite and method of use	2021	Arábia Saudita	King Fahd University of Petroleum And Minerals
US10870088	Composite photocatalysts embedded in microporous membranas	2020	Arábia Saudita	King Abdulaziz University
US10888845	Graphene-tungsten oxide-metal boride/hydroxide photocatalysts, and methods for organic pollutant degradation and hydrogen production	2021	Arábia Saudita	King Abdulaziz University

US20200122130	Two-dimensional nitrogen-doped carbono-based titanium dioxide composite material, and preparation method and application thereof for degrading and removing organic pollutants in water	2020	China	Soochow University
IN201731043481	A clay based nano confined reactor	2018	Índia	S.N. Bose National Centre For Basic Sciences
US20110266136	Doped titanium dioxide as a visible and sun light photo catalyst	2011	Estados Unidos	Varma Rajender S.
BR 10 2015 003191 2 B1	Processo de deposição de nano partículas em suportes cerâmicos ou metálicos, processos para tratamento de efluentes orgânicos mediante emprego de catalisadores constituídos por suportes cerâmicos ou metálicos com nano partículas e sistemas para tratamento de efluentes mediante emprego de catalisadores constituídos por suportes cerâmicos ou metálicos com nano partículas	2015	Brasil	Carlyle Antonio Cunha / Carlos Salles Lambert / Marcos Adriano Okamura
BR 10 2013 005935 8 B1	Processo de obtenção de nanocompósitos magnéticos a partir de efluentes e resíduos, produtos e uso	2013	Brasil	Universidade Federal de Minas Gerais

Fonte: A autora, 2022.

APÊNDICE C – Patentes solicitadas utilizadas como referência para a prospecção tecnológica

Tabela 17 - Lista das patentes solicitadas considerada para elaboração do *technology roadmap* (continua).

Número	Título	Ano	País	Cessionário
CN112892536A	Preparation method of composite photocatalyst, composite photocatalyst and degradation method of dye wastewater	2021	China	Yanshan University
CN112588306A	Magnetically separable composite photocatalyst BiOBr/CoFe ₂ O ₄ as well as preparation method and application thereof	2021	China	Shandong University of Technology
CN109833862A	Preparation method of reduced graphene oxide/titanium dioxide double-shell hollow-sphere composite photocatalysis material	2019	China	Taiyuan University of Technology
CN108640197A	Treatment and purification method of dyeing wastewater produced by wood processing	2018	China	Funan Daxi Willow Arts & Crafts Co., Ltd.
CN108503014A	Method for catalyzing H ₂ O ₂ to degrade basic fuchsin by adopting nano magnetic beads	2018	China	Changsha University of Science & Technology
CN108067268A	Preparation of one-dimensional nanotubular Ag/AgCl/AgBr composite heterojunction visible light catalyst and application thereof	2018	China	Fuzhou University
CN108014783A	Preparation method of nanocomposite material for degrading colored dye wastewater	2018	China	Ma Miao
CN107262111A	Magnetic iron-based composite catalyst and preparation method thereof	2017	China	Jiangsu University of Technology
CN105776351A	Cationic modification method for magnetic ferroferric oxide	2016	China	Tianjin Polytechnic University
IN201711007013	A NOVEL HYBRID WORKING-MODE BASED PHOTOCATALYTIC REACTOR SYSTEM FOR THE TREATMENT OF THE NONBIODEGRADABLE AND/OR RECALCITRANT POLLUTANTS IN WASTEWATER STREAMS AND/OR DISCHARGED EFFLUENTS AND ITS METHOD OF WORKING	2019	Índia	The Energy And Resources Institute (TERI)

IN202111015994	METHOD AND APPARATUS FOR THE TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER	2021	Índia	Indian Institute of <i>Technology</i> Kanpur
IN202121044961	A MECHANICAL STIRRING PHOTOCATALYTIC REACTOR	2021	Índia	RK University
IN201911011873	A HYBRID TERNARY PHOTOCATALYST FOR THE RAPID TREATMENT OF WATER CONTAMINATED WITH RHODAMINE B DYE	2020	Índia	Shoolini University of <i>Biotechnology</i> and Management Sciences
IN1825/DEL/2015	AN EFFICIENT AND ECONOMICAL GREEN PROCESS FOR PRIMARY TREATMENT OF EFFLUENT AS WELL AS SLUDGE OF TEXTILE & DYEING INDUSTRY	2016	Índia	Amity University
IN202121045074	METHOD FOR PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF DRIMAREN ORANGE P2R DYE USING ZIF-8/AG3PO4/PVDF PHOTOCATALYTIC MIXED MATRIX MEMBRANAS	2021	Índia	S. V. National Institute of <i>Technology</i>
IN201911015554	HYBRID HYDROGEL GRAFTED WOOD HUSK FOR REMOVAL AND DEGRADATION OF DYE FROM WATER EFFLUENTS	2020	Índia	Amity University
IN202041024472	DECOLOURING AND DYE REMOVAL AGENT	2021	Índia	Karunya Institute of <i>Technology</i> And Sciences
IN201931000965	A MAGNETICALLY SEPARABLE AND RECYCLABLE G-C3N4/FE3O4/POROUS RUPN NANOCATALYST FOR THE PHOTOCATALYTIC DECOMPOSITION OF WATER SOLUBLE AROMATIC AMINES	2020	Índia	Indian Institute of <i>Technology</i> Bhubaneswar
IN202141007302	LOW COST HYBRID SYSTEM BASED ON HYDRODYNAMIC CAVITATION AND HYDROGEL ADSORPTION FOR TEXTILE DYE WAST	2021	Índia	National Institute of <i>Technology</i> , Warangal
US20210155514	ROBUST FLOW-THROUGH PLATFORM FOR ORGANIC CONTAMINANTS REMOVAL	2021	Estados Unidos	Northeastern University
US20190099743	CATALYST COMPOSITION INCLUDING A BIOCHAR, AND RELATED METHODS	2019	Estados Unidos	Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College
IN202141032880	METHOD FOR REMOVING DYE POLLUTANTS AND BACTERIAL PATHOGENS USING QUATERNARY ZNO-PBO-CDO-CUO NANOCOMPOSITE	2021	Índia	DR. G. Murugadoss

WO2016172755	NON-COVALENT MAGNETIC GRAPHENE OXIDE COMPOSITE MATERIAL AND METHOD OF PRODUCTION THEREOF	2016	Austrália	Monash University
IN201911047855	A MAGNETIC NANO-PHOTOCATALYST AND A METHOD OF PREPARATION THEREOF	2021	Índia	Indian Institute of Technology Delhi
CN106587383	WASTEWATER TREATMENT AGENT FOR DYEING AND TEXTILE INDUSTRIES AND PREPARATION METHOD THEREOF	2017	China	Henan Shuijingtou Cultural Media Co., Ltd.
IN202011008530	AG DOPED-BIOXS (BIOBR/BIOI/BIOCI) NANOCOMPOSITE IMPREGNATED 2-D CYLINDRICAL ACTIVATED CARBAN BLOCK FOR PHOTOCATALYTIC APPLICATIONS	2021	Índia	Amity University
US20210079226	METALLOPHTHALOCYANINE-ZNO HOLLOW NANOSPHERES COMPOSITE	2021	Arábia Saudita	Imam Abdulrahman Bin Faisal University
IN3994/DEL/2015	ALGAL-GO NANOCOMPOSITES FOR THE REDUCTION OF TEXTILE DYES	2017	Índia	Amity University
AU2017101171	THE SYNTHESIS OF GO/HEMIN/TIO ₂ NANOCOMPOSITE CATALYST AND THE PHOTOCATALYTIC DEGRADATION RATE OF ORGANIC POLLUTANTS	2017	Austrália	Chen, Liang MR
IN201811044916	AN ALKALINE EARTH METAL DOPED ZINC OXIDE NANOSHEETS AND METHOD OF PREPARATION THEREOF	2020	Índia	Indian Institute of Technology (Banaras Hindu University), Varanasi
US20190282970	ONE-STEP SCALABLE FABRICATION OF MECHANICALLY ROBUST VISIBLE-LIGHT RESPONSIVE OXIDE-MODIFIED METALLIC MULTIFUNCIONAL MEMBRANAS	2019	Arábia Saudita	King Fahd University of Petroleum and Minerals
IN201841015633	FACILE GREEN SYNTHESIS OF IRON OXIDE NANOPARTICLES USING ACALYPHA INDICA L. - A SIDDHA MEDICINAL PLANT AND IT'S APPLICATION THEREOF	2019	Índia	Central Council for Research in Siddha
WO2019088928	BIMETALLIC HYBRID CATALYSTS FOR CATALYTIC OXIDATION OF ORGANIC POLLUTANTS	2019	Singapura	Nanyang Technological University
WO2018127753	PHOTOCATALYTIC FILTER	2018	Irã	Mirhoseini, Farid
IN3409/DEL/2015	METHOD OF SYNTHESIZING ZNO:METAL (METAL: ZN, AG) CORE-SHELL NANOPARTICLES	2016	Índia	The LNM Institute of Information Technology
US20200316577	METAL OXIDE NANOFIBROUS MATERIALS FOR PHOTODEGRADATION OF ENVIRONMENTAL TOXINS	2020	Estados Unidos	The Research Foundation for The State

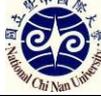
				University of New York
WO2011019322	TITANATE / TITANIA COMPOSITE NANOPARTICLE	2011	Singapura	Nanyang Technological University
WO2013144660	PHOTOCATALYST	2013	Inglaterra	Keronite International Limited
WO2014049165	PHOTOCATALYTIC COMPOSITES	2014	Inglaterra	Cambridge Enterprise Limited
WO2021026392	METAL-OXIDE NANOPARTICLES, PHOTOCATALYTIC NANOSTRUCTURES, AND RELATED METHODS	2021	Estados Unidos	University of Miami
WO2014207754	REDUCED GRAPHENE OXIDE-SILVER PHOSPHATE (RGO-AGP) AND A PROCESS FOR THE PREPARATION THEREOF FOR THE PHOTODEGRADATION OF ORGANIC DYES	2014	Índia	Council of Scientific & Industrial Research
US20200180969	PREPARATION OF SIO ₂ -TIO ₂ COMPOSITE AEROGELS AND SIO ₂ @TIO ₂ CORE-SHELL AEROGELS WITH HIGH THERMAL STABILITY AND ENHANCED PHOTOCATALYSIS	2020	Estados Unidos	Lawrence Livermore National Security, LLC
WO2017071580	A COMPOSITE PHOTOCATALYST, PREPARATION AND USE THEREOF	2017	China	University of Shanghai For Science and Technology
BR 10 2018 069217 8 A2	Nano Fotocatalisadores De Pentóxido De Nióbio Dopados Com Zinco (Nb ₂ O ₅ :Zn) De Alta Atividade No Visível E Método De Obtenção	2018	Brasil	Universidade Federal de São Carlos
BR 10 2020 018036 3 A2	Processo De Obtenção De Macroestruturas Porosas De Grafeno E Partículas De Prata	2020	Brasil	Universidade Federal do Pampa
BR 10 2014 031165 3 A2	Reator Fotocatalítico De Microcanais Para Tratamento De Efluentes Emergentes E Sistema De Tratamento	2014	Brasil	Ministério da Ciência e Tecnologia / Universidade Federal de Pernambuco
BR 10 2015 008336 0 A2	Preparações Enzimáticas Compreendendo Enzimas Imobilizadas Em Nanotubos De Carbono, Processo De Obtenção E Uso	2015	Brasil	Universidade Federal de Minas Gerais / Universidade Federal de Viçosa
BR 10 2018 015844 9 A2	Imobilização De Nanopartículas De Tio ₂ Em Fibras Poliméricas E Produto Obtido	2018	Brasil	Instituto De Tecnologia E Pesquisa/ Universidade Tiradentes

BR 10 2018 075168 9 A2	Filme Compreendendo Fibras De Tio2 Dopado Com H2wo4 Ou Tio2 Dopado Na2wo4.2h2o, Processo De Obtenção E Uso Do Filme	2018	Brasil	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
BR 10 2019 001910 7 A2	Processo Para Remoção De Corantes De Efluentes Industriais Utilizando Reator De Leito Fluidizado Composto Por Nanopartículas Bimetálicas De Fe/Ni Suportadas Em Esferas De Quitosana E Uso	2019	Brasil	Universidade Federal de Viçosa
BR 10 2019 001907 7 A2	Nanopartículas Bimetálicas À Base De Fe/Ni Suportadas Em Esferas De Quitosana, Processos De Síntese E Uso	2019	Brasil	Universidade Federal de Viçosa
BR 10 2016 030179 3 A2	Processo De Síntese De Nanopartículas Polimetálicas, A Partir De Placas De Circuito Impresso, Nanopartículas Polimetálicas E Uso Dessas	2016	Brasil	Universidade Federal de Viçosa

Fonte: A autora, 2022.

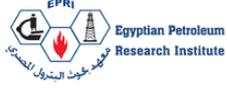
APÊNDICE D – Logomarcas das instituições citadas no *technology roadmap*

Tabela 18 - Lista das logomarcas das instituições considerada para elaboração do *technology roadmap* (continua).

Instituição	Logotipo	Instituição	Logotipo
Academy of Scientific and Innovative Research		Nanchang University	
Agile Environmental Protection Group, Yulin Xntao Environmental Protection Technology Co., Ltd.		Nanjing Agricultural University	
Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture		Nanoscience African Network (NANOAFNET), iThemba LABS-National Research Foundation	
Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences		Nantong University	
Alagappa University		Nanyang Technological University	
Aligarh Muslim University		National Chi Nan University	
Amirkabir University of Technology		National Institute for Biotechnology and Genetic Engineering	
Amity University		National Institute for Lasers, Plasma and Radiation Physics	
Bartın University		National Institute for Research & Development in Chemistry and Petrochemistry—ICECHIM	
BCMaterials, Basque Center for Materials, Applications and Nanostructures		National Institute of Technology Karnataka Surathka	
Beijing University of Chemical Technology		National Institute of Technology, Warangal	
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)		Near East University	
Beni-Suef University		Ningde Normal University	
Bilkent University		Noida Institute of Engineering and Technology	

Binzhou University		Northeast Electric Power University	
Bioproducts Research Unit		Northeast Forestry University	
Bohai University		Northeastern University	
California Institute of Technology		Nuclear Research Center, Atomic Energy Authority, Egypt	
Cambridge Enterprise Limited		Osun State University	
Cape Breton University		Palamuru University	
Central Council for Research in Siddha		Panjab University	
Central Michigan University		Peking University	
Central South University		Plastica Alfa SpA	
Central South University of Forestry and Technology		Politecnico di Torino	
Central University of Gujarat		Qingdao University of Science & Technology	
Central University of Tamil Nadu		Qingyuan Yuelunew Material Tech Co., Ltd.	
Centro de Investigación en Materiales Avanzados		Quaid-i-Azam University	
Chandigarh University		Renmin University of China	
Chang'an University		Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)	
Changchun University of Technology		RK University	

Changsha University of Science & Technology		RMIT University	
Chiang Mai University		S. N. Bose National Centre for Basic Sciences	
China University of Geosciences Beijing		S. V. National Institute of Technology	
Chinese Academy of Agricultural Sciences		Sadakathullah Appa College	
Chinese Academy of Forestry		Sahand University of Technology	
Chinese Academy of Geological Sciences		Shandong University of Technology	
Chinese Academy of Sciences		Shanghai Jiao Tong University	
Chulalongkorn University		Shantou University	
City of Scientific Research and Technological Applications		Shenzhen University	
Civil Aviation University of China (CAUC)		Shoolini University	
CNR Italy		Soochow University	
Council of Scientific & Industrial Research (CSIR)		South China Normal University	
Dalian Polytechnic University		South China University of Technology	
Dalian University of Technology		Southwest University	
Deakin University		Sri Lanka Institute of Nanotechnology (SLINTEC)	
Debre Berhan University		SRM Institute of Science and Technology, Kattankulathur, Chennai, Tamilnadu	

Deemed University		Step-Up Jewels PVT. Ltd. Khatodara Gate	<i>Step-Up Jewels PVT. Ltd. Khatodara Gate</i>
Diponegoro University		Stockholm University	 Stockholm University
Djillali Liabes University Sidi Bel Abbas		Sunway University	SUNWAY UNIVERSITY 
Donghua University		Surface Engineering Area, IK4- CIDETEC	cidetec  surface engineering
East West Institute of Technology		Suzhou University of Science and Technology	
ECO Environmental Investment Limited		Taiyuan University of Technology	
Ecole Nationale Polytechnique		Technische Universität Dresden	
Egyptian Petroleum Research Institute		Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias	 Tecnológico de Monterrey
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)		TERI School of Advanced Studies	
Universidade Federal de Lavras (UFLA)		Textile Research Institute	
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)		Thapar Institute of Engineering and Technology	
Funan Daxi Willow Arts & Crafts Co., Ltd.	<i>Funan Daxi Willow Arts & Crafts Co., Ltd.</i>	The Energy and Resources Institute (TERI)	 The Energy and Resources Institute
Universidade Federal de São Carlos		The Hong Kong Polytechnic University	
Universidade Federal do Pampa		The LNM Institute of Information Technology	
Fuzhou University		The Regents of the University of California	
Government College University		The Research Foundation for The State University of New York	

Guangdong Guangye Environmental Protection Industrial Group Co., Ltd.		Tianjin Chengjian University	
Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd.		Tianjin Polytechnic University	
Guangxi University		Tongji University	
Guilin University of Technology		Tra Vinh University	
Hangzhou Normal University		Tsinghua University	
Hanoi University of Science and Technology		UDES_CDER	
Harbin Institute of Technology		Universidad de Chile	
Hazara University		Universidad Industrial de Santander	
Henan Shuijingtou Cultural Media Co., Ltd.		Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia	
Henan University		Universidad Politécnica de Madrid	
Hunan University of Arts and Science		Universidade do Porto	
Imam Abdulrahman Bin Faisal University		Universidade Federal de Itajubá	
Indian Institute of Science Education and Research Bhopal		Universidade Federal de Minas Gerais	
Indian Institute of Science Education and Research Kolkata		Universidade Federal de Santa Catarina	
Indian Institute of Technology (Banaras Hindu University), Varanasi		Universidade Federal de Viçosa	
Indian Institute of Technology Bhubaneswar		Universidade Federal do Rio Grande do Norte	

Indian Institute of Technology Delhi		Universidade Federal do Rio Grande do Sul	
Indian Institute of Technology Kanpur		Università Cattolica del Sacro Cuore	
Industrial University of HoChiMinh City		Università di Ferrara	
Institute for Color Science and Technology		Universitas Indonesia	
Institute of Nano Science and Technology		Universitat Autònoma de Barcelona	
Institute of Technology Bandung		Universitat Jaume I	
Institute on Membrane Technology, ITM-CNR		Université du 20 Août 1955 de Skikda	
Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV), CSIC		Universiti Kebangsaan Malaysia	
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, ICMM/CSIC		Universiti Malaysia Perlis	
Instituto de Tecnologia e Pesquisa		Universiti Putra Malaysia	
Instituto Nacional de Tecnología (INT)		Universiti Tun Hussein Onn Malaysia	
International Iberian Nanotechnology Laboratory		Universiti Tunku Abdul Rahman	
Iran University of Science and Technology		University of Agriculture Faisalabad	
Isfahan University of Technology		University of Genoa	
Islamic Azad University		University of Kashan	
Istituto Italiano di Tecnologia		University of Malta	

Jackson State University		University of Miami	
Jamia Millia Islamia (A Central University)		University of Minho	
Jeonbuk National University		University of Mumbai	
Jiangsu University		University of Nottingham Ningbo China	
Jiangsu University of Science and Technology		University of Peradeniya	
Jiangsu University of Technology		University of Santiago de Compostela	
Jilin Institute of Chemical Technology		University of Science & Technology of China	
Joseph Ayo Babalola University		University of Science and Technology Beijing	
Karunya Institute of Technology and Sciences		University of Shanghai for Science and Technology	
Keronite International Limited		University of Sindh	
Khalifa University		University of South Africa	
King Abdulaziz University		University of Southern California	
King Fahd University of Petroleum and Minerals		University of Tabriz	
Korea Environmental Industry and Technology		University of Technology Iraq	
Korea Institute of Science and Technology (KIST)		University of the Punjab	
Korea University		University of Zagreb	

KTH Royal Institute of Technology		University Politehnica of Bucharest	
KU Leuven		Vaal University of Technology	
Kyung Hee University		Vietnam Academy of Science and Technology	
Lawrence Livermore National Security, LLC		VŠB-Technical University of Ostrava	
Leibniz Institute of Polymer Research Dresden e.V.		West Pomeranian University of Technology in Szczecin	
Leitat Technological Center		West Virginia University	
Liaocheng University		Wuhan Institute of Technology	
Liaoning University		Wuhan Textile University	
LNEC—National Laboratory for Civil Engineering (Water Quality and Treatment Laboratory, Urban Water Unit, Hydraulics and Environment Department)		Xi'an Polytechnic University	
Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College		Xi'an University of Architecture and Technology	
M S Ramaiah Institute of Technology		Xi'an University of Technology	
Manipal Institute of Technology (Manipal Academy of Higher Education)		Xinjiang University	
Mehran University of Engineering & Technology		Xinxiang Medical University	
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia		Yan'an University	
Menoufia University		Yanshan University	
Ministério da Ciência e Tecnologia		Yantai University	

Mirpur University of Science and Technology (MUST)		Zhejiang Ocean University	
Monash University		Zhejiang University of Technology	
Marcos Adriano Okamura, Carlyle Antonio Cunha e Carlos Salles Lambert (Cessionário sem vínculo institucional)	Marcos A. Okamura.	Firouzeh Siadatnasab, Saeed Farhadi e Akram-Alsadat Hoseini (Cessionário sem vínculo institucional)	Firouzeh Siadatnasab
Baolin Deng (Cessionário sem vínculo institucional)	Baolin Deng	Yasser Abdul Motalib Abdul Hady Abdul Motalib (Cessionário sem vínculo institucional)	Yasser Abdul Motalib Abdul
Varma Rajender S. (Cessionário sem vínculo institucional)	Varma Rajender S.	Ma Miao (Cessionário sem vínculo institucional)	Ma Miao
Dr. G. Murugadoss (Cessionário sem vínculo institucional)	Dr. G. Murugadoss	Mr. Liang Chen (Cessionário sem vínculo institucional)	Mr. Liang Chen
Farid Mirhoseini (Cessionário sem vínculo institucional)	Farid Mirhoseini		

Fonte: A autora, 2022.