Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciência

Instituto de Química

Amanda Silva de Andrade

Technology roadmap aplicado a tendência tecnológica para tratamento de efluente sanitário

Rio de Janeiro

2024

Amanda Silva de Andrade

Technology roadmap aplicado a tendência tecnológica para tratamento de efluente sanitário

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: Fundamentos de Engenharia Química e Engenharia de Processos.

Orientadores: Prof.º Dr. Marco Antonio Gaya de Figueiredo

Prof.ª Dra. Erika Queiros Eugenio

Rio de Janeiro

2024

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

A554 Andrade, Amanda Silva de.

Technology roadmap aplicado a tendência tecnológica para tratamento de efluente sanitário. – 2024.
175 f.

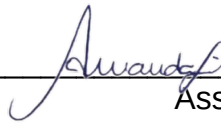
Orientador (a): Marco Antonio Gaya de Figueiredo
Erika Queiros Eugenio

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

1. Águas residuais – Purificação - Teses. 2. Esgotos – Teses. I. Figueiredo, Marco Antonio Gaya de. II. Eugenio, Erika Queiros. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Química. IV. Título.

CDU 628.315

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



Assinatura

15/08/2024
Data

Amanda Silva de Andrade

Technology roadmap aplicado a tendência tecnológica para tratamento de efluente sanitário

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: Fundamentos de Engenharia Química e Engenharia de Processos.

Aprovada em 15 de agosto de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Gaya de Figueiredo (Orientador)
PPGEQ/UERJ

Profa. Dra. Erika de Queiros Eugenio (Orientadora)
FAT/UERJ

Prof. Dr. André Luis Alberton
PPGEQ/UERJ

Prof. Dra. Betina Maciel Versian
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dr. Fábio Leal Mendes
Petrobrás/Cenpes

Rio de Janeiro
2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, antes de tudo, Autor e Consumador da minha fé, Socorro bem presente nas adversidades.

A minha família por toda educação, apoio e incentivos oferecidos durante a dedicação a este projeto e em toda minha vida acadêmica.

Aos amigos que sempre se disponibilizaram a ajudar de alguma maneira com todo apoio e suporte. Aos colegas de trabalho que me incentivaram todas as vezes a persistir e não desistir.

A todos os professores que de certa forma contribuíram, em todo o curso, para minha formação. Em especial meus orientadores, Professor Dr. Marco Antonio Gaya (PPGEQ-UERJ) e Professora Dra. Erika Eugenio (FAT-UERJ), por todo estímulo e conhecimentos repassados. Por toda paciência, motivação e incentivo ao longo do mestrado, o meu muito obrigada!

Nobody said it was easy. No one ever said it would be this hard**.**

The Scientist, Coldplay

RESUMO

ANDRADE, Amanda Silva. *Technology roadmap aplicado a tendência tecnológica para tratamento de efluente sanitário*. 2024. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

No Brasil o lançamento indiscriminado de esgotos sanitário sem tratamento tem sido a principal fonte poluidora de rios e corpos receptores. Em 2020 apenas 55% da população do país era atendida com rede de esgoto e 50,8% de todo esgoto gerado no país recebia tratamento adequado. O Novo Marco do Saneamento sancionado pelo Governo Federal objetiva universalizar esses serviços até 2033 de forma que 90% tenha acesso a coleta e tratamento de esgoto. Normalmente, empregam-se tecnologias mais robustas e com opções de tratamento para altos volumes de esgoto gerado, no entanto faz-se necessário aplicar tecnologias mais simples para volumes menores em localidades com menor demanda urbana. Além disso, a escolha de processos precisa levar em consideração as condições do local, clima, custo de mão de obra e do tratamento, custo de coleta e direcionamento do esgoto e principalmente as características do efluente a ser tratado. Tendo em vista a relevância do tema, a presente pesquisa teve por finalidade utilizar um método de tomada de decisão, sendo este o *Technology Roadmapping Method (TRM)*, para avaliar as tendências em termos de tratamento de esgoto e possibilidades de reutilização da água produzida. De maneira a cumprir o objetivo central, foram estabelecidos os objetivos específicos tais como; realizar um levantamento, via pesquisa bibliográfica, da evolução das tecnologias utilizadas no tratamento de esgoto sanitário de forma a direcionar as alternativas atualmente aplicadas. Identificar possíveis padrões de qualidade para água de reuso no Brasil. Construir um mapa que indique a tendência tecnológica de tratamento de efluente buscando identificar possibilidade para produção de água para reuso a curto, médio e longo prazo e traçar possíveis linhas futuras para desenvolvimento tecnológico para produção de água para reuso. A metodologia de aplicação do TRM utilizada para alcançar os objetivos dividiu-se em três etapas principais: uma etapa pré-prospectiva, etapa prospectiva, que corresponde à busca direcionada em que os documentos são levantados e analisados a curto, médio e longo prazo. E etapa pós-prospectiva em que o *roadmap* (organização das informações com alocação temporal) é elaborado. Por fim, foi possível concluir que balizado no resultado do roadmap, não há mudanças bruscas em termos de tecnologias a curto e médio prazo, a não ser uma tendência em relação a compactação das técnicas. A longo prazo, as tecnologias disruptivas, como os tratamentos oxidativos avançados associados aos demais tratamentos convencionais, se mostram um caminho como terciários. Não há homogeneização da regulamentação no país, sendo necessário definição e ajuste dos padrões a nível federal e que considerem que as maiorias das aplicações envolvem lançamento no solo. Por fim, recomendam-se pesquisas futuras que utilizem insumos sustentáveis, que garantam redução dos impactos ambientais.

Palavras-chave: esgoto; tratamento de efluentes; technology roadmapping; roadmap

ABSTRACT

ANDRADE, Amanda Silva. *Technology roadmap applied to technological trends for sewage effluent treatment*. 2024. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

In Brazil, the indiscriminate release of untreated domestic sewage has been the main source of pollution in rivers and receiving bodies. In 2020, a sewage network served only 55% of the country's population and 50.8% of all sewage generated in the country received adequate treatment. The New Sanitation Framework sanctioned by the Federal Government aims to universalize these services by 2033 so that 90% have access to sewage collection and treatment. More robust technologies with treatment options are usually used for high volumes of sewage generated; however, it is necessary to apply simpler technologies for smaller volumes in locations with lower urban demand. Furthermore, the choice of processes must take into account the local conditions, climate, labor and treatment costs, sewage collection and disposal costs, and especially the characteristics of the effluent to be treated. Given the relevance of the topic, this research aims to use a decision-making method, the Technology Roadmapping Method (TRM), to assess trends in terms of sewage treatment and possibilities for reusing produced water. In order to fulfill the main objective, specific objectives were established, such as: conducting a survey, through bibliographic research, of the evolution of technologies used in the treatment of sanitary sewage in order to direct the alternatives currently applied; identifying possible quality standards for reused water in Brazil; constructing a map that indicates the technological trend of effluent treatment, seeking to identify possibilities for producing water for reuse in the short, medium and long term and to outline possible future lines for technological development for the production of water for reuse. The TRM application methodology used to achieve the objectives is divided into three main stages: a pre-prospective stage; a prospective stage, which corresponds to the targeted search in which documents are collected and analyzed in the short, medium and long term; and a post-prospective stage in which the roadmap (organization of information with temporal allocation) is prepared. Finally, it was possible to conclude that, based on the roadmap results, there are no sudden changes in terms of technologies in the short and medium term, except for a trend towards the compaction of techniques. In the long term, disruptive technologies, such as advanced oxidative treatments associated with other conventional treatments, are seen as a tertiary path. There is no homogenization of regulations in the country, requiring the definition and adjustment of standards at the federal level, considering that most applications involve land release. Finally, future research is recommended that uses sustainable inputs, which guarantee a reduction in environmental impacts.

Keywords: sewage; effluent treatment; technology roadmapping; roadmap

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução temporal da quantidade de documentos por ano de publicação. 26
Figura 2 – Total de documentos publicados por países entre os anos de 2013-2023 26
Figura 3 – Ciclo sustentável de uma estação de tratamento de efluente 31
Figura 4 – Evolução temporal das publicações sobre *roadmap* na base *Web of Science* 49
Figura 5 – Camadas, tempo, elementos e caminhos estratégicos de um *roadmap* ..53
Figura 6 – Exemplo para composição de camadas e linhas do tempo do *roadmap* .54
Figura 7 – Elementos que conduzem o processo de *roadmapping*.....55
Figura 8 – Fluxograma da metodologia da pesquisa.....61
Figura 9 – Estrutura das camadas e subcamadas do *roadmap* 65
Figura 10 - Exemplo de alocação das tecnologias e a relação com a taxonomia 68
Figura 11 – Esquema do BIOPAQ®UBOX concebido pela Paques.....75
Figura 12 – Comparação entre o floco de lodo ativado e o grânulo aeróbio da tecnologia Nereda®.....76
Figura 13 – Esquema do Sanitaire ICEAS™ Advanced SBR da Xylem.....78
Figura 14 – Série histórica de patentes concedidas.....82
Figura 15 – Patentes concedidas por instituição de origem 82
Figura 16 – Porcentagem de patentes concedidas por classe de "Tendências e direcionadores" 84
Figura 17 – Porcentagem de patentes concedidas por classe de "Processo de tratamento".....85
Figura 18 - Processos e associações entre processos de tratamento 86
Figura 19 – Porcentagem de patentes concedidas por classe de "Tecnologia de tratamento".....87
Figura 20 – Tecnologias, associações de técnicas compondo tecnologias e arranjos apresentados nas patentes concedidas 88
Figura 21 – Série histórica de patentes solicitadas 89
Figura 22 – Patentes solicitadas por instituição de origem 90

Figura 23 - Porcentagem de patentes solicitadas por classe de "Tendências e direcionadores" 91
Figura 24 – Porcentagem de patentes solicitadas por classe de "Processo de tratamento"....93
Figura 25 – Associação entre processos nas patentes solicitadas 94
Figura 26 – Porcentagem de patentes solicitadas por classe de "Tecnologia de tratamento"....95
Figura 27 – Série histórica dos artigos científicos publicados 98
Figura 28 – Revistas com 2 ou mais artigos científicos publicados entre 2013-202399
Figura 29 – Porcentagem de artigos científicos por classe de "Tendências e direcionadores" 101
Figura 30 – Porcentagem de artigos científicos por classe de "Processo de tratamento"....102
Figura 31 – Porcentagem de artigos científicos por classe de "Tecnologia de tratamento"....103
Figura 32 – Technology Roadmapping: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Estágio Atual 108
Figura 33 – Technology Roadmapping: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Curto Prazo 110
Figura 34 – Technology Roadmapping: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Médio Prazo (a) 114
Figura 35 – Technology Roadmapping: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Médio Prazo (b) 115
Figura 36 – Technology Roadmapping: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Longo Prazo (a)....122
Figura 37 – Technology Roadmapping: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Longo Prazo (b)....123

Figura 38 – Technology Roadmapping: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Longo Prazo (c) 124
Figura 39 – Technology Roadmapping: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Longo Prazo (d).....125
Figura 40 – Distritos do Município de Carmo-RJ.....127
Figura 41 – Rede de esgotamento sanitário em Carmo-RJ 129
Figura 42 - Setorização do município de Carmo 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Operações, processos ou sistemas comumente utilizados para tratamento de esgoto doméstico 23
Tabela 2 – Exemplos de processos mais utilizados no tratamento convencional de esgoto 24
Tabela 3 – Parâmetros de qualidade para reuso de água não potável 38
Tabela 4 – Critérios mínimos para reuso urbano de acordo com as recomendações do Interáguas 39
Tabela 5 – Comparação entre os limites de qualidade da água de reuso apresentados nas regulamentações estaduais 40
Tabela 6 – 10 principais categorias de publicação sobre roadmap no *Web of Science* 50
Tabela 7 – Conjuntos de classificação das ETEs no Brasil 71
Tabela 8 – Arranjos tecnológicos usuais no Brasil para tratamento de esgoto sanitário 73
Tabela 9 – Panorama geral no município de Carmo-RJ. 126
Tabela 10 – Quantidade de patentes concedidas por subcamada do roadmap 83
Tabela 11 – Quantidade de patentes solicitadas por subcamada do roadmap 90
Tabela 12 – Refinamento de Artigos Científicos no Scopus 97
Tabela 13 – Quantidade de artigos científicos publicados por subcamada do roadmap 100
Tabela 14 – Tecnologias aplicadas aos processos oxidativos 104
Tabela 15 – Listagem de patentes concedidas utilizadas como referência na prospecção a curto prazo (continua) 144
Tabela 16 – Listagem de patentes solicitadas utilizadas como referência na prospecção a médio prazo (continua) 146
Tabela 17 – Listagem de artigos científicos publicados utilizados como referência na prospecção a longo prazo (continua) 151

LISTA DE SIGLAS

AHP	Análise Hierárquica de Processos
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPAR	Estação Produtora de Água de Reuso
ESG	*Environmental, Social and Governance*
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
ISO	*International Organization for Standardization*
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
UN	Nações Unidas
SINIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
TRM	*Technology Roadmapping Method*
UASB	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente
WWF	*World Wildlife Fund*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 14

OBJETIVOS DA PESQUISA 17

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

1.1. Tratamento de efluentes domésticos e urbanos 19

1.1.1. Tratamentos de água e esgoto: contextualização 19

1.1.2. O processo de tratamento de esgoto convencional 21

1.1.3. Panorama preliminar da literatura sobre tratamento de esgoto 24

1.1.4. Sistemas centralizados e descentralizados para reuso de água 27

1.1.5. Produção de biogás e aproveitamento energético 30

1.2. Aspectos importantes acerca do reuso de água produzida 34

1.2.1. Aspectos legais acerca do reuso de água 36

1.2.2. Qualidade da água como requisito primordial para o reuso 41

2. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA E TECHNOLOGY ROADMAPPING METHOD (TRM) 45

2.1. Ferramentas de prospecção tecnológica 45

2.2. *Technology Roadmapping Method* (TRM) 47

2.3. O processo de *roadmapping* 51

2.4. Estrutura e arquitetura do TRM 52

2.4.1. Processo de aplicação do TRM 55

2.4.2. Fontes de informações tecnológicas: artigos científicos e patentes 57

3. METODOLOGIA 59

3.1. Metodologia do *Technology Roadmapping* 59

3.2. Metodologia da pesquisa 61

3.3. Metodologia para elaboração do *technology roadmapping* 62

3.3.1. Etapa pré-prospectiva 62

3.3.2. Etapa prospectiva 63
3.3.2.1. Taxonomia: aspectos mais relevantes 64
3.3.3. Etapa pós-prospectiva 67
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 70
4.1. Etapa pré-prospectiva 70
4.1.1. Tecnologias e arranjos tecnológicos atuais 70
4.2. Etapa Prospectiva 80
4.2.1. Prospecção a curto prazo: patentes concedidas 81
4.2.1.1. Análise Macro 81
4.2.1.2. Análise Meso 83
4.2.1.3. Análise Micro 83
4.2.2. Prospecção a médio prazo: pedidos de patentes 88
4.2.2.1. Análise Macro 89
4.2.2.2. Análise Meso 90
4.2.2.3. Análise Micro 91
4.2.3. Prospecção a longo prazo: artigos científicos 96
4.2.3.1. Análise Macro 98
4.2.3.2. Análise Meso 99
4.2.3.3. Análise Micro 100
4.3. Fase Pós-Prospectiva: elaboração do *roadmap* 105
4.3.1. *Roadmap* do estágio atual 106
4.3.2. *Roadmap* a curto prazo 109
4.3.3. *Roadmap* a médio prazo 111
4.3.4. *Roadmap* a longo prazo 116
4.4. Caso de um município de pequeno porte 126
CONCLUSÃO 133
REFERÊNCIAS 136
APÊNDICE A – Patentes concedidas utilizadas na prospecção tecnológica **144**

APÊNDICE B – Patentes solicitadas utilizadas na prospecção tecnológica **146**

APÊNDICE C – Artigos científicos utilizados na prospecção tecnológica ..**151**

APÊNDICE D – Logomarcas utilizadas no *roadmap* **163**

INTRODUÇÃO

O saneamento, que em sua definição significa tornar higiênico ou tornar saudável, tem sido cada vez mais discutido no decorrer dos anos pelo mundo em decorrência dos efeitos da sua falta, seja na qualidade de vida da população quanto na relação com o meio ambiente. Sendo este composto por quatro serviços básicos: o abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza e manejo dos resíduos sólidos e drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. A água é um recurso de suma importância, tanto em relação à potabilidade quanto ao uso geral nas aplicações dela em diversos setores, e sua gestão precisa ser efetiva a fim de que o recurso seja aproveitado da melhor maneira sem desperdícios ou perdas devido ao descarte indevido. Desta forma, o impacto causado pelo lançamento dos efluentes, tanto urbanos quanto industriais, nos corpos d'água tem sido alvo de preocupação no mundo todo (Oliveira; Von Sperling, 2005).

O Brasil é um dos países com maior disponibilidade de água doce no mundo, no entanto o recurso hídrico é mal distribuído devido à ocupação urbana desordenada. De acordo com a Secretaria Nacional de Meio Ambiente (SNSA), que publicou em dezembro de 2023 o Diagnóstico Temático: Serviços de Água e Esgoto (SNSA, 2023) – dados do ano de 2022 – na região Norte, que corresponde a 5% da população residente, é onde se concentra a maior parte da água doce do país. Em contraste, nas regiões com maiores concentrações populacionais como Nordeste e Sudeste (69%), por exemplo, dispõe cerca de menos de 10% dos recursos disponíveis para consumo. Segundo o documento, aproximadamente 80% do volume abastecido é convertido em esgoto. Neste quadro, os problemas relacionados à escassez aparecem e necessitam de maior atenção.

Em relação à qualidade deste recurso, as más condições de rios ou corpos d'água poderiam, em teoria, estar relacionadas com a ineficiência dos tratamentos utilizados, incapacidade técnica ou falta de coberturas das redes coletoras. No Brasil, apesar das diversas fontes de poluição da água, o lançamento

indiscriminado de esgotos domésticos sem tratamento é a principal fonte (Jordão; Pessôa, 2011). Segundo os dados publicados no painel do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) – que utiliza como base os dados do ano de 2022 – cerca de 56% da população total do país era atendida com rede de esgoto, havendo um aumento de 9,8% comparado aos dados de 2010. Ainda assim, em termos de tratamento, 52,2% do esgoto gerado no país recebe tratamento adequado antes de serem lançados nos corpos hídricos (SNIS, 2023), o que mostra que a falta do tratamento é um fator considerável.

Normalmente, opções de tratamento a nível terciário ou avançado são empregadas para alto volume de esgoto. No entanto, é possível aplicar tecnologias mais simples para volumes menores, levando em consideração a relação custo-benefício. Dessa forma, locais que atualmente não são atendidos por um tratamento adequado poderão ser beneficiados. Para isso, diversos fatores precisam ser levados em consideração como clima, condições locais, custo de mão de obra, custo do tratamento, o tipo de processo que será adotado e principalmente as características do esgoto (Von Sperling, 2014).

De posse dessas informações, entende-se que o setor de saneamento precisa de um alto investimento no Brasil. O Governo Federal sancionou o Novo Marco do Saneamento, cujo objetivo é universalizar os serviços até 2033 de forma a garantir que 99% da população Brasileira tenha acesso a água potável e 90% à coleta e tratamento adequado de esgoto (Brasil, 2020).

Visto a importância do tema somado às informações obtidas, torna-se necessário a identificação de diferentes alternativas e principalmente novos estudos referentes às novas tecnologias e inovação a respeito do tratamento de efluente urbano. Neste caminho, uma cidade, por exemplo, que possui rede de coleta, mas não possui o tratamento de efluente urbano (somente despejo) precisa ser levado ainda em conta que seja um processo moderno, com produtos de fácil aquisição, tecnologias que não apresentem muita manutenção, com poucos equipamentos mecânicos, sem ignorar os custos associados.

A presente pesquisa tem a finalidade de, através de um método de tomada de decisão utilizando a tecnologia do *roadmapping*, avaliar a tendência em termos

de tratamento de esgoto e obtenção de água para reuso para aplicação em municípios de pequeno porte. O *roadmapping* apresenta uma abordagem estratégica com objetivo que visa planejamento e/ou gerenciamento de tecnologias, mercados e inovações. A abordagem pode ser dividida em dois pontos principais: o *roadmap*, que é o mapa visual dos caminhos visando o objetivo e o processo de *roadmapping*, que é toda a preparação, aplicação, execução e consolidação dos resultados (Oliveira *et al*., 2012).

OBJETIVOS DA PESQUISA

Objetivo geral

Utilizar a abordagem estratégia de *roadmapping* aplicado na seleção de alternativas para o tratamento de efluente doméstico e urbano, que possibilitem o reuso em um município pequeno que não possui tratamento de esgoto.

Objetivos específicos

De maneira a atender o objetivo geral, a presente dissertação tem como objetivos específicos:

- Realizar um levantamento via pesquisa bibliográfica, da evolução das tecnologias utilizadas no tratamento de esgoto sanitário de forma a direcionar as alternativas atualmente aplicadas.
- Construir um mapa que indique a tendência tecnológica de tratamento de efluente buscando identificar possibilidade para produção de água para reuso a curto, médio e longo prazo.
- Identificar possíveis padrões de qualidade para água de reuso no Brasil.
- Traçar possíveis linhas futuras para desenvolvimento tecnológico para produção de água para reuso.

Estrutura do trabalho

A dissertação foi dividida em quatro capítulos: 1) Revisão da literatura, 2) *Technology Roadmapping*, 3) Metodologia e 4) Resultados e Discussão. Por fim, é apresentada a conclusão, seguida das referências bibliográficas e apêndices.

O primeiro capítulo se inicia com uma breve revisão bibliográfica a respeito do tema "Tratamento de Efluente Urbano" mostrando um panorama geral de tratamento, processos e aspectos importantes a serem considerados na implementação. O capítulo também conta com um levantamento legal acerca dos padrões estabelecidos nas normas aplicáveis[1] (ABNT, 2019a; ABNT, 2019b) e demais legislações vigentes a fim de garantir que a água não potável obtida como produto do tratamento possa ser reutilizada. O segundo capítulo tem por objetivo apresentar e explicar o que é e quais são os conceitos e bases para aplicação de um *roadmapping*.

O terceiro capítulo refere-se à metodologia utilizada na presente dissertação para atender o objetivo geral do trabalho. Neste capítulo, são apresentados a metodologia detalhada para obtenção e organização dos dados obtidos na pesquisa. Além disso, são definidas as etapas da pesquisa e aplicação do *Technology Roadmapping*.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados da pesquisa. Inicialmente, a fase de prospecção tecnológica foi realizada, sendo dividida entre estágio atual e mais três partes: curto, médio e longo prazo. No estágio atual é apresentado o que atualmente é utilizado e completado com uma discussão e informações complementares a respeito de um município, na região Sudeste do Brasil, que ainda hoje não coleta e nem trata o efluente gerado. O capítulo é finalizado com o *roadmap* completo.

Por fim, a conclusão da dissertação apresenta uma análise crítica a respeito de toda a pesquisa e os principais resultados obtidos na construção do *roadmap*.

[1] A ABNT NBR 16.782/2019 e 16.783/2019, citadas no corpo da dissertação, discorrem acerca do reuso da água não potável proveniente de um tratamento de esgoto sanitário adequado.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo apresenta o estado de arte desta dissertação, iniciado com uma contextualização a respeito do tratamento de efluentes urbanos e sua importância.

1.1. Tratamento de efluentes domésticos e urbanos

1.1.1. Tratamentos de água e esgoto: contextualização

Dentro dos serviços fundamentais para preservação ambiental e qualidade de vida que constituem o saneamento básico, pode-se destacar o fornecimento de água potável e tratamento de efluente urbano. Sendo alvo de interesse global, em 2010, as Nações Unidas (UN) reconheceu a água potável e esgotamento sanitário como direito essencial para proveito de vida (UN, 2010).

O aumento no índice de concentração urbana combinados à falta de planejamento desencadeiam um crescimento desordenado em locais com pouca estrutura e investimento, resultando na falta de saneamento básico adequado, o que atinge diretamente a qualidade de vida da população. Assim, o saneamento é um dos focos dos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) sendo este incorporado ao objetivo 6 – água potável e saneamento - que garante, além do saneamento para todos, a gestão de águas (UN, 2015).

Políticas públicas de saneamento básico mais inclusivas são incentivadas tendo em base as metas globais e promovendo acesso à locais que não fazem a gestão correta dos resíduos gerados (sendo estes aquosos ou não). Visto isso, no Brasil pode-se citar dois marcos legais a respeito do saneamento: a Lei nº 11.445/2007 (Brasil, 2007) e uma atualização em 2020 por meio da Lei nº

14.026/2020 (Brasil, 2020), conhecida também como o Novo Marco Regulatório do Saneamento, que dispõe a respeito de infraestrutura, instalações e operações.

Neste Novo Marco, a ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico) passou a ditar as normas de referência, tendo como objetivo que o saneamento no Brasil atinja um novo patamar. Dentro dessas normas de referência pode-se citar: metas de universalização dos serviços públicos de saneamento básico; reuso de efluentes sanitários tratados; sistema de avaliação do cumprimento de metas de ampliação e universalização da cobertura dos serviços públicos de saneamento e conteúdo mínimo para a prestação universalizada e para sustentabilidade econômico-financeira dos serviços públicos de saneamento básico (Brasil, 2020).

Segundo o SNIS (2023), no ano de 2022, 84,9% da população total residente no Brasil foi atendida por um sistema de abastecimento de água, seja completo ou simplificado. No contexto do esgotamento sanitário, 56% da população foi conectada à rede coletora. Em 2010, essa porcentagem era de 46,2%, o que representava menos da metade da população. No entanto, em termos de volume de esgoto gerado, 52,2% recebem tratamento adequado. Em 2020 esse número era de 50,8%, o que significa que cerca da metade do esgoto produzido no Brasil ainda é lançado no corpo hídrico sem nenhum tratamento.

Esses dados refletem a dimensão do desafio ambiental de adequação. Além disso, a falta de planejamento, desinformação e construções de domicílios de forma irregular contribuem para a não utilização da rede de esgoto, ou seja, desarticulação entre políticas públicas e mobilidade urbana. Atualmente, a meta do Governo Federal com o Novo Marco Regulatório do Saneamento é universalizar os serviços até 2033 de forma a garantir que 99% da população Brasileira tenha acesso a água potável e 90% à coleta e tratamento adequado de esgoto.

Para o tratamento de esgotamento sanitário considera-se uma rede de coleta, o encaminhamento para uma ETE e após, o descarte do efluente tratado. O grau do tratamento necessário é sempre em função do corpo receptor, e deve-se levar em consideração a capacidade de autodepuração e as características e

condições de despejo. É com esse foco que o tratamento e as alternativas para atingir as condições necessárias são propostas. Considerando ainda a realidade local atendida, o nível de eficiência desejado, a área disponível para sua alocação, custo, complexidade de implantação e operação, condicionantes ambientais, entre outros.

Dentre as alternativas para o tratamento de esgoto sanitário pode-se destacar oito (8) como os mais comuns (Von Sperling, 2014): fossas sépticas, fossas sépticas seguidas de filtro anaeróbico, reatores anaeróbicos de fluxo ascendente (UASB), lodo ativado convencional, lodo ativado com aeração prolongada, reator UASB seguido de reatores biológicos, lagoa facultativa seguida de lagoa de estabilização, lagoa aerada seguida de lagoa de decantação, lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa. Dentre estas alternativas, a que apresenta menor eficiência de remoção são as fossas sépticas, no entanto são as normalmente mais utilizadas. Quando seguidas por filtro anaeróbio a eficiência do sistema de tratamento é aumentada (Von Sperling, 2014).

1.1.2. O processo de tratamento de esgoto convencional

O esgotamento sanitário pode ser classificado em dois sistemas: o sistema individual (ou estático) e o sistema coletivo (ou dinâmico) (Von Sperling, 2014). A diferença está no fato de que, em áreas com um pequeno número de residências ou mesmo unidades individuais, pode-se empregar o sistema estático. Esse método compreende soluções implantadas localmente, como fossas sépticas, tanques sépticos e sistemas de infiltração ou sanitários higiênicos. Esta abordagem pode ser viável em regiões com baixa densidade populacional e solos com boas condições à infiltração.

No sistema coletivo, uma determinada área é servida por uma rede coletora que direciona o esgoto para uma estação em que é tratado e enviado ao

corpo receptor. Neste sistema, a rede coletora pode conduzir esgotos sanitários e águas de chuva de forma combinada ou separada. Normalmente, utiliza-se o sistema separador tendo em vista os inconvenientes que o sistema combinado pode trazer, como tubulações maiores com ociosidade em períodos de seca, altos custos (operação e manutenção) e riscos de refluxos para as residências nos períodos de cheias (Von Sperling, 2014).

Na estação de tratamento de esgoto, o efluente passa por uma série de etapas pré-estabelecidas que visam remover ou transformar os poluentes que constituem a carga bruta. Para o projeto da estação é necessário ter conhecimento dos objetivos do tratamento, saber qual o impacto ambiental será causado no corpo d'água receptor, tendo em vista a legislação vigente, qual a eficiência de remoção e nível de tratamento a qualidade final está associada.

Usualmente o tratamento de esgoto, em escala macro, é dividido em quatro níveis (Von Sperling, 2014):

- Nível preliminar: etapa fundamental que visa a remoção de sólidos de maiores dimensões. Geralmente, utiliza-se um tipo de gradeamento (mecanismo físico) para tal.
- Nível primário: tem por objetivo a remoção de sólidos suspensos sedimentáveis e em alguns casos remoção da matéria orgânica associada aos sólidos suspensos. Mecanismos físicos são predominantes.
- Nível secundário: tem foco na matéria orgânica (sólidos dissolvidos), predominando os mecanismos biológicos.
- Nível terciário: tem a remoção de poluentes específicos (metais pesados e organismos patogênicos) ou não biodegradáveis como foco. Geralmente associado aos processos de nível secundário.

Geralmente, refere-se a ETE em classificação pelo maior nível de tratamento utilizado. Por exemplo, uma ETE nível terciário significa que os processos de tratamento chegam até o nível terciário. A Tabela 1 apresenta, em

forma de resumo, a relação entre os focos de remoção no tratamento de esgoto e as operações e processos frequentemente usados para cada um. A associação dessas diferentes operações determina o fluxograma de uma ETE convencional.

Tabela 1 – Operações, processos ou sistemas comumente utilizados para tratamento de esgoto doméstico

Poluente	Operação, processo ou sistema
Sólidos em suspensão	Gradeamento
	Remoção
	Sedimentação
	Disposição no solo
Matéria orgânica biodegradável	Lagoas de estabilização e variações
	Lodos ativados e variações
	Reatores aeróbios com biofilmes
	Tratamento anaeróbio
	Disposição no solo
Organismos patogênicos	Lagoas de maturação
	Disposição no solo
	Desinfecção com produtos químicos
	Desinfecção com radiação ultravioleta
	Membranas
Nitrogênio	Nitrificação e desnitrificação biológica
	Lagoas de maturação e de alta taxa
	Deposição no solo
	Processos físico-químicos
Fósforo	Remoção biológica
	Lagoas de maturação
	Processos físico-químicos

Fonte: Von Sperling, 2014.

Pode-se dividir os processos de tratamento entre: físicos, em que predominam as ações de forças físicas como o caso do gradeamento ou

sedimentação; químicos, em que ocorre o tratamento por conversão dos poluentes como os processos de coagulação e flotação por exemplo; e, por fim, os processos biológicos em que a transformação ocorre por vias biológicas, como os processos de digestão. A Tabela 2 apresenta exemplos de processos e como são utilizados convencionalmente.

Tabela 2 – Exemplos de processos mais utilizados no tratamento convencional de esgoto

Processos	Exemplos
Troca de gás	Adição de oxigênio ou ar ao esgoto; adição de cloro gasoso
Gradeamento	Grades de barras ou peneiras
Sedimentação	Retirada de areia através de caixas de areia, retirada de sólidos sedimentáveis por decantadores
Flotação	Remoção de gordura e óleo por aeração, remoção de partículas em suspensão por aeração ou outro agente
Coagulação Química	Adição de cloreto férrico ou sulfato de alumínio ao esgoto para coagulação ou floculação
Precipitação Química	Adição de cal ao esgoto rico em ferro produzindo flocos que sedimentam.
Filtração	Filtração lenta através de leitos de areia e cascalhos
Desinfecção	Ozonização, ação de raios ultravioleta, cloração
Oxidação Biológica	Aeração dos esgotos, filtração biológica, digestão do lodo

Fonte: Borges, E. A. M. A., 2018 *apud* Jordão; Pessôa, 2017.

1.1.3. Panorama preliminar da literatura sobre tratamento de esgoto

De forma a se obter uma visão geral do assunto abordado na presente dissertação, foi realizada uma busca preliminar na base *Scopus*. Esta foi escolhida por ser uma base acadêmica importante e para que desta forma fossem

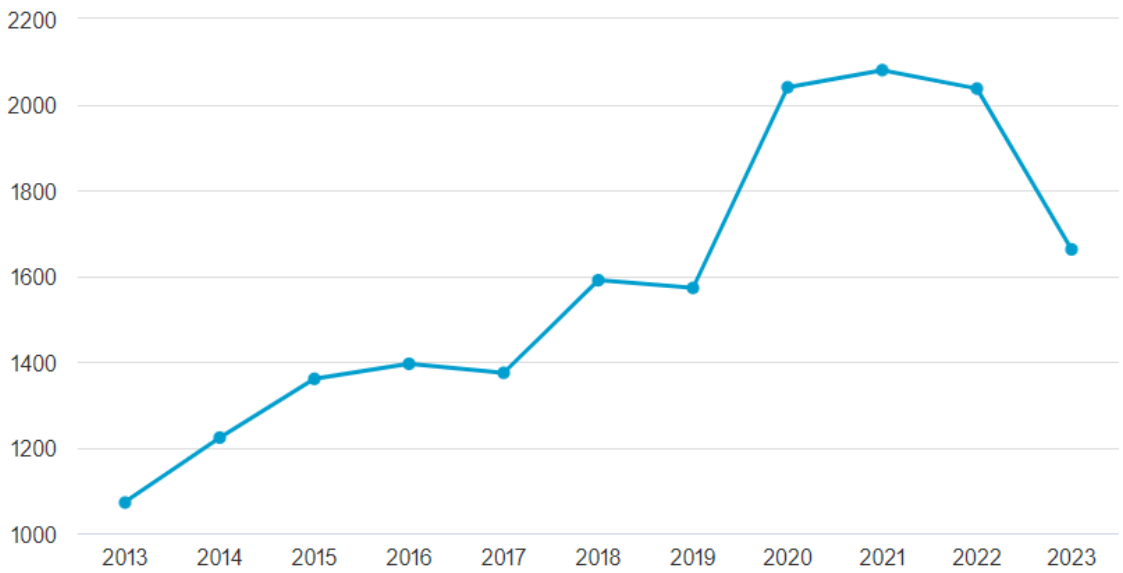
analisados os artigos publicados a respeito do tema. As informações disponibilizadas servem de base para avaliar o que tem sido feito a respeito do tema e analisar tendências nos estudos e alguns parâmetros como autores, ano de publicação, país, revista, área de concentração e etc.

Em uma busca generalizada a respeito do tema e utilizando o termo *sewage treatment* como palavra-chave e com buscas realizadas em todos os campos, gerou-se um resultado com 301.292 arquivos. Com aplicação de limites de 10 anos (de 2013 a 2023) e adição de filtros para a pesquisa nas áreas de concentração Engenharia Química, Química e Engenharia, foram obtidos 79.399 documentos totais. A busca foi ainda refinada em títulos, resumos e palavras-chave, reduzindo o número total de documentos para 17.406. Dos 17.406 documentos, 14.300 são artigos.

A Figura 1 apresenta como se comportou a evolução temporal do número de artigos sobre o tema “tratamento de esgoto” neste intervalo de anos. Pode-se notar o aumento na realização de estudos a respeito do tratamento de esgoto neste período. O assunto é de extrema importância, notado por esse crescente na pesquisa ano a ano. O final do ano de 2019 foi marcado pelo início da pandemia da Covid-19. Neste período pandêmico – anos de 2020 e 2021 – é possível notar um pico de publicações sobre o tema. O destaque para esse período é que o saneamento básico foi um dos setores de preocupação quanto à saúde pública, pois estão diretamente relacionados.

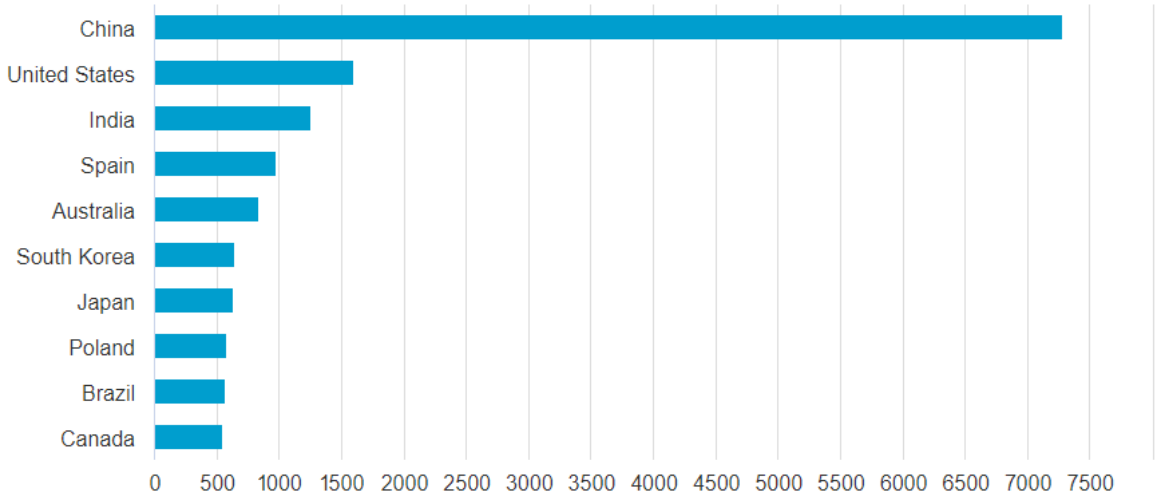
Em relação aos países, a China lidera em números de documentos, quase o dobro do total publicado do país seguinte, os Estados Unidos, como apresentado na Figura 2. O Brasil ocupa o nono lugar em publicações acerca do tratamento de esgotos, aproximadamente 6,8% do que a China produziu no mesmo espaço de tempo.

Figura 1 – Evolução temporal da quantidade de documentos por ano de publicação.



Fonte: *Scopus*, 2023.

Figura 2 – Total de documentos publicados por países entre os anos de 2013-2023



Fonte: *Scopus*, 2023.

A busca por “tratamento de esgoto” gera um resultado muito amplo de pesquisa, visto a abrangência do tema. Dentro do tratamento de esgoto pode-se estudar alternativas de tratamento, processos específicos de remoção de

compostos, novos aditivos químicos, assim como a gestão de esgoto, saúde da população, condição do meio ambiente em relação ao esgoto analisado e assim por diante. Isso é observado por meio da abrangência de áreas de concentração sobre o tema, contendo artigos nas mais diversas áreas.

Para direcionar a pesquisa dentro do tema desejado a respeito de alternativas para tratamento de efluentes em aplicação em municípios de pequeno porte, foram realizadas algumas buscar utilizando palavras-chaves com relação ao tema, como “*residencial*” e “*sewage*”. Depois de uma leitura e análise rápida dos resumos e conteúdo abordado foram descartados os documentos que não se relacionavam diretamente ao tema.

Os assuntos de maior incidência nos resultados obtidos em ambas as buscas são discutidos nos tópicos a seguir de forma a criar uma base para esta dissertação e contribuir para a revisão bibliográfica. Pode-se destacar que a respeito do tema, os sistemas de tratamento de esgoto municipal podem se classificar em dois grupos: sistemas centralizados e descentralizados. As pesquisas realizadas também se dividiram nos produtos gerados na ETE em: reutilização do efluente tratado como aplicação na agricultura e jardinagem, principalmente; tratamento e utilização do lodo gerado a fim de ser utilizado na produção de biofertilizantes; e, geração de energia através do tratamento biológico, com aproveitamento energético e diminuição das emissões.

1.1.4. Sistemas centralizados e descentralizados para reuso de água.

Apesar dos impactos positivos causados pela urbanização, crescimento e desenvolvimento da sociedade, ainda há um custo quando se fala de meio ambiente. A falta de água, em consequência do mau uso ou poluição, faz com que novas alternativas precisem ser elaboradas. Neste caminho, uma opção é o reuso da água tratada.

Reutilizar a água permite atender dois objetivos muito claros em relação ao meio ambiente: reduzir a demanda por água doce e reduzir necessidades de tratamentos mais complexos e extras para águas residuais. Os produtos obtidos no tratamento de esgoto (sólido e líquido) podem ser fonte de fertilizantes naturais, como fósforo e nitrogênio, e utilizado para aplicações não potáveis, como na agricultura, jardinagem ou áreas verdes (Ghafoori *et al.*, 2021).

Os sistemas centralizados, como o nome já sugere, corresponde a centralização do tratamento de efluente em uma unidade a qual recebe todo o resíduo aquoso gerado no município ou até mesmo bairro, dependendo da extensão. Todo o processo de tratamento ocorre nesta unidade e, posteriormente, é destinado à disposição. Já no caso dos sistemas descentralizados, cada conjunto com um número reduzido de habitantes recebe uma unidade simples para tratar o efluente doméstico gerado no local.

A maior parte dos sistemas na América Latina são centralizados. Boa parte com baixa manutenção ou até mesmo manutenção não regular, o que contribui para se tornar uma fonte de poluição e neste contexto uma solução descentralizada suplementar pode beneficiar o local e ainda contribuir com fornecimento de água para reuso (Garcia *et al.*, 2022). Estudos com foco nesses sistemas têm sido abordados em alguns países como na Índia e México, por exemplo (Chaisar; Garg, 2021; Garcia *et al.*, 2022).

Devido à diferença nas configurações é notório que as estações centralizadas necessitem de equipamentos com maior robustez tecnológica, assim como lidam com maiores consumos de energia e uma maior infraestrutura, como por exemplo as longas redes de coleta. Se a água tratada for destinada ao reuso, também haverá o gasto com a redistribuição. Neste aspecto, as estações descentralizadas apresentam vantagens, visto que a água, além de tratada, é reutilizada no local, diminuindo os custos de implementação, manutenção e bombeamento.

Atualmente, a agricultura é o principal setor responsável pelo uso da água doce no mundo, sendo a maior parte da aplicação na irrigação (UNESCO, 2021). A alternativa do uso de águas residuais, tratando-se de pequenos produtores

agrícolas, pode apresentar uma solução não só para a redução na captação, mas também para fornecimento de nutrientes provenientes da água recuperada à agricultura.

Estévez *et al.* (2022) apresentaram um estudo a fim de avaliar tanto o perfil ambiental quanto o perfil econômico de uma configuração híbrido-descentralizada e outra centralizada, com o objetivo de alcançar uma gestão eficiente do tratamento de efluente e recuperação de recursos. O sistema híbrido-descentralizado contou com sanitários ultra-vácuo e unidades anaeróbias termofílicas. Essa configuração conta com unidades descentralizadas para tratamento de água proveniente de sanitários e centralizado para as chamadas águas cinzas (banheiro, lavanderias e etc.).

O sistema centralizado contou com sanitário convencional, bombeamento, lodo ativado, digestão anaeróbia e compostagem. O parâmetro de avaliação foi a análise, custo e ciclo de vida ambiental. Como resultado, as cargas totais para todos os indicadores analisados (recurso fóssil e ecotoxicidade marinha/terrestre, por exemplo) foram menores para o sistema descentralizado, além de ser possível aproveitar os nutrientes para aplicação na agricultura como biofertilizantes.

O estudo aponta ainda que em sua pesquisa diversos autores demonstraram redução do impacto ambiental quando aplicado o sistema descentralizado ao invés de um sistema centralizado. É importante destacar que a produção de biofertilizante foi a partir do sistema descentralizado, visto que o lodo obtido no sistema centralizado não era viável para se utilizar na fertilização.

Ghafoori *et al.* (2021) analisaram 61 bairros da área urbana da cidade de Pardis, no Irã, de forma individual como uma avaliação quanto à possibilidade de reutilização de águas residuais utilizando os sistemas de tratamentos centralizado e descentralizado. Em termos econômicos, a reutilização baseada em sistemas descentralizados apresentou vantagem sobre a opção centralizada, resultando em um aumento da renda regional e uma redução do consumo de água.

Um estudo de modernização no Ecoparque de Tijuana, no México, aplicou sistema descentralizado fazendo uso do filtro aerado de gotejamento como

unidade principal para o tratamento biológico. No México, segundo Garcia *et al.* (2022), normalmente utiliza-se nas ETEs lodo ativado como tratamento principal. Essas abordagens descentralizadas apresentam vantagens em termos de redução de custos de aquisição de água e na demanda de água doce. Além disso, podem reduzir grandes demandas de energia, principalmente quando localizadas próximas ao local de reuso.

Os parâmetros utilizados por Garcia *et al.* (2022) para a comparação de eficiência entre o sistema centralizado e o descentralizado foram temperatura, pH, teor de óleo e graxa, sólidos suspensos totais, DBO, DQO, nitrogênio total, fósforo total, coliformes totais e alguns metais. Assim, o estudo mostrou que além de uma economia na demanda de água, a modernização do Ecoparque apresentou uma melhor eficiência, em termos gerais, nos tratamentos de efluentes analisados.

Reutilizar águas residuais não é uma opção recente. Existem diversas fontes de estudos e aplicações de água proveniente de esgoto principalmente para o solo e para agricultura (Angelakis, 2021). No entanto, avançar com o tratamento adequado para que a reutilização seja o máximo viável, com menor impacto possível ao meio ambiente e à saúde pública, se faz necessário que os estudos sejam aprimorados com novas tecnologias. Assim, este recurso pode se tornar uma alternativa à escassez de água.

1.1.5. Produção de biogás e aproveitamento energético

Inúmeros benefícios podem ser alcançados quando a ETE opera de modo sustentável, como a diminuição da captação através do reuso do efluente tratado, abordado no item 1.2.4. Também por meio da modernização dos processos, diminuindo então emissão de gases e odores, e processos que diminuam a geração de lodos contaminados.

Neste cenário, é possível aplicar a economia circular. Do ponto de vista energético, as ETEs podem desempenhar um papel importante viabilizando este conceito no município. A Figura 3 apresenta de forma visual este ciclo através de

uma ETE sustentável como um ponto dentro de uma economia circular que pode gerar múltiplos benefícios para a sociedade e o meio ambiente.

A partir do esgoto bruto e tratamento adequado, os resíduos da ETE (sólido, líquido e gás) podem ser reaproveitados como no reuso da água, na obtenção de biofertilizantes através dos resíduos sólidos gerados (lodo em condições adequadas para produção e aplicação no solo) e diminuição das emissões com produção de biogás para aproveitamento energético.

Figura 3 – Ciclo sustentável de uma estação de tratamento de efluente

Fonte: Adaptado de ABIOGÁS (Associação Brasileira do Biogás), 2021.

O biogás é principalmente composto por metano (CH_4), um dos principais gases de efeito estufa, que possui um potencial de poluição e contribuição para o aquecimento global significativamente maior do que o do dióxido de carbono (CO_2). No tratamento biológico de esgoto por via anaeróbia ocorre a produção de biogás, que tem um potencial energético alto, capaz de produzir energia

sustentável ao mesmo tempo que diminui o impacto ambiental causado pelas emissões. A energia química pode então ser convertida em elétrica, térmica ou mecânica (Abiogás, 2021).

Em 2021, a ABiogás (Associação Brasileira do Biogás) destacou que a produção de biogás é um caminho de alta prospecção visto os benefícios, como a redução de emissões e promoção da economia circular, melhoria na sustentabilidade, transformação de um passivo ambiental em um ativo energético, incentivo ao desenvolvimento regional etc. Pode-se destacar ainda a fácil escalabilidade visto que a produção pode ser feita em diferentes escalas e de forma descentralizada.

Em termos de aproveitamento energético, as estações de tratamento de esgoto e águas residuais podem desempenhar um papel importante. Em grandes cidades além da autossuficiência, essas plantas podem fornecer energia extra às vizinhanças. Em escala real, poucas ETEs já desempenham este papel em países subdesenvolvidos, estando a maioria delas em países desenvolvidos utilizando a recuperação de biogás por codigestão.

Dois estudos destacados por Chrispim *et al.* (2021) envolvem a utilização de sistemas de microalgas e codigestão. No entanto, ainda há necessidade de estudos em escala real e de longo prazo para consolidar esses métodos, além de pesquisas futuras sobre soluções descentralizadas e em pequena escala para recuperação de biogás.

No Brasil, segundo os cálculos realizados pela ABiogás (2021), o potencial de biogás proveniente de esgoto sanitário no ano de 2019, caso fosse aproveitado em sua totalidade, seria de 1,18 milhões de MWh/ano, o que abasteceria 587 mil residências, ou até mesmo 375 milhões de Nm^3/ano de biometano que poderia substituir 347 milhões de litro de diesel.

Devido a concentração da população e potência econômica, hoje a região sudeste é a de maior potencial futuro de produção de biogás, com estimativas de produzir até 976 GWh de energia elétrica e 312 M litros de diesel (Abiogás, 2021). Assim, o biogás pode ter um papel importante na descarbonização nesta região podendo ser utilizado para aplicação em diversos setores.

Na Áustria, para atingir as metas nacionais de energia, a produção de biometano deve aumentar de 0,16% da demanda de gás natural para 10% em 2030. Como a digestão anaeróbia do lodo pode ser utilizada para produção de biogás, acredita-se que a técnica pode ser utilizada com grande potencial energético visando o biogás e o biometano como substitutos do gás natural em processo de alta temperatura e armazenamento a longo prazo (Tauber *et al.*, 2021).

No país existem padrões a serem atendidos para injeção de biogás na rede de gás natural. Desta forma, Tauber *et al.* (2021) utilizaram uma via de metanação biológica para converter o dióxido de carbono no biogás obtido em ETE em metano como alternativa energética possível, obtendo resultados positivos no estudo.

O aumento na produção de biogás em uma ETE pode ser realizado de diversas maneiras, como adicionar co-substrato ao lodo para digestão, modificar as configurações da ETE para processos com maior rendimento em reatores de lodo ativado, melhorar a separação do lodo primário com aplicação de coagulantes e também realizando o pré-tratamento do lodo (Hagos *et al.*, 2017; Ge *et al.*, 2017; Kooijman *et al.*, 2017; Budych-Gorzna *et al.*, 2021).

Quando comparado os sistemas híbrido-descentralizado e centralizado, Estevéz *et al.* (2022) abordou a produção de biofertilizantes e biogás a partir do efluente tratado no sistema descentralizado. O estudo, portanto, utiliza os conceitos apresentados neste tópico visando uma ETE de acordo com a economia circular, permitindo obtenção de água de reuso e biofertilizantes de forma segura e ecológica.

No cenário descentralizado, o biogás foi produzido pela unidade de digestão anaeróbia termofílica e enviado para uma caldeira a qual produz o calor necessário para o funcionamento da unidade de digestão. O excedente pôde, então, ser fornecido ao bairro receptor. O consumo de energia térmica para elevar a temperatura do efluente na unidade de digestão é compensado pela energia obtida através do biogás. Além disso, o aumento da temperatura melhora a

remoção de patógenos, beneficiando o biofertilizante produzido (Estevés *et al.* 2022).

Budych-Gorzna *et al.* (2021) realizaram pré-tratamento alcalino para digestão anaeróbia visando a produção de biogás e equilíbrio energético da estação de tratamento de esgoto. O teste realizado em escala laboratorial resultou que o pré-tratamento térmico alcalino do lodo levou ao aumento na produção de biogás, e segundo os autores este método pode proporcionar, em escala real, uma possibilidade de maior independência energética da ETE municipal e reduzir custos.

Dizer que uma ETE é autossuficiente em energia significa que a ETE tem capacidade e pode gerar aproximadamente 100% ou mais de energia necessária para seu funcionamento sem a necessidade de compra de fornecedores externos (companhias de energia, por exemplo). Atualizar processos e substituir equipamentos é um dos caminhos para reduzir o consumo, ao passo que o tratamento do efluente também seja um gerador de energia. Como mostrado, a combinação de modernização à produção de biogás é uma alternativa para alcançar a suficiência.

De acordo com Chrispim *et al.* (2021) as principais lacunas encontradas para implementar a recuperação de energia nas cidades por meio do tratamento de água são o alto custo de investimento nas tecnologias, falta de confiabilidade técnica e os requisitos climáticos e de localização favoráveis. Além disso, esbarram nos desafios financeiros, técnicos, operacionais e regulatórios das cidades.

1.2. Aspectos importantes acerca do reuso de água produzida

Sabe-se que a água superficial, como rios e córregos e águas subterrâneas, como obtidas através da perfuração de poços artesianos, são as principais fontes convencionais de água. Além dessas fontes, pode-se destacar o

que é chamado “fontes sustentáveis de água”, ou seja, fontes alternativas que permitem obtenção de água além das convencionais, no entanto demandam processos específicos para seu uso e aplicação. Pode-se citar aqui a água do mar, água de chuva e as chamadas águas para reuso.

Como alternativa e incentivo ao uso racional de água, principalmente em um cenário pós-pandêmico, de acordo com a Water Europe (2020), é o desenvolvimento de uma sociedade inteligente quando o assunto é água. Aproveitar, reutilizar ou reciclar a água de forma a distribuí-la e aplicá-la em quantidade e qualidade suficientes mostra como os índices de reuso podem ser de suma importância para o desenvolvimento, principalmente, de regiões com escassez do recurso e/ou com desenvolvimento econômico desfavorecido.

Diversos países, já aplicam a prática do reuso para reduzir conflitos, garantir quantidade diminuir a demanda nos mananciais – superficiais ou subterrâneos – como países do Oriente Médio (Marin *et al.*, 2017), Índia (Chaisar; Garg, 2021), México (Garcia *et al.*, 2022) e etc. Um destaque quanto ao reuso pode ser dado a Israel. Atualmente, o país utiliza cerca de 87% do efluente tratado na irrigação, o que supera 40% da demanda de água que seria destinada a agricultura (Marin *et al.*, 2017).

Do ponto de vista legal, o Brasil não possui atualmente uma regulamentação específica a nível nacional para padrões de reuso de água em suas modalidades. No entanto, possui programas, como o Programa Interáguas que apresenta orientações acerca dos padrões de qualidade visando proteção à saúde e meio ambiente e também aos planos de ações e políticas para o reuso, com metas de implantação a curto, médio e longo prazo no Brasil (Interáguas, 2018).

A Lei nº 14.026/2020 que atualizou o Marco do Saneamento Básico cita o reuso do efluente sanitário, o que já é um ponto de destaque quanto à prática tendo em vista a falta de texto legal direta para tal (Brasil, 2020). Em níveis estaduais, pode-se destacar que alguns estados já apresentam alguns documentos regulamentadores que definem padrões para água de reuso de

acordo com a aplicabilidade (irrigação, industrial, ambiental, etc.), sendo alguns deles: São Paulo, Minas Gerais e Ceará (Santos; Lima, 2022).

1.2.1. Aspectos legais acerca do reuso de água

A prática de reutilização da água no mundo não é um conceito novo. A aplicação de resíduos gerados pela população, seja no solo, principalmente, é uma prática que provém desde a antiguidade (Angelakis *et al.*, 2018). No entanto, quando se fala em reuso da água para aplicações potáveis ou aplicações não potáveis, o aspecto legal para tal ainda não é tão específica.

A nível federal pode-se citar como textos legais alinhados com o reuso de água no Brasil:

- ✓ Lei nº 9.433/1997 – Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997);
- ✓ Lei nº 11.445/2007 – Diretrizes para o Saneamento Básico (Brasil, 2007);
- ✓ Lei nº 14.026/2020 – Atualização do Marco Legal do Saneamento Básico (Brasil, 2020);
- ✓ CONAMA nº 357/2005 – Classificação de Corpos Hídricos (CONAMA, 2005);
- ✓ CONAMA nº 430/2011 – Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes (CONAMA, 2011);
- ✓ CONAMA nº 503/2021 – Critérios e Procedimentos para o Reuso em Sistemas de Fertirrigação de Efluentes Provenientes de Indústrias de Alimentos, Bebidas, Laticínios, Frigoríficos e Graxarias (CONAMA, 2021).;

- ✓ CNRH 54/2005 – Diretrizes para Reuso Direto Não Potável de Água (CNRH, 2006);
- ✓ Interáguas/2017 – Proposta para Política de Reuso de Efluente Sanitário Tratado no Brasil (Interáguas, 2017).

A interpretação e junção dos pontos citados nos textos legais acima permitem criar estratégias para reuso de um efluente tratado. A CONAMA nº 357/2005 realiza a classificação das águas (corpos hídricos) de acordo com a qualidade requerida para seus usos preponderantes (CONAMA, 2005). No entanto, a falta de um texto legal específico para reuso de águas cinzas ou esgoto doméstico pode gerar certa confusão entre os parâmetros extraídos textos legais citados.

Por exemplo, a CONAMA nº 357/2005 diz que em uma água natural Classe 2 não pode ser excedido o limite de 10^3 NMP/100mL em coliformes termotolerantes para recreação de contato primário, irrigações (parques, jardins, campos, hortaliças...) com os quais haja contato direto com o público. Podendo ainda haver irrigação de culturas arbóreas com até $4x10^3$ NMP/100mL (neste casso, corpos hídricos classificados como Classe 3) (CONAMA, 2005).

A CONAMA nº 274/2000 diz que, para águas destinadas à balneabilidade (recreação de contato primário, como por exemplo: natação, mergulho e esqui aquático), é considerado satisfatório quando “80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo 10^3 coliformes fecais (termotolerantes) ou 800 *Escherichia coli* ou 100 enterococos por 100 mililitros” (CONAMA, 2000).

Em contrapartida, a NBR 16.783/2019, conforme apresentado na Tabela 3 dispõe que o limite para que a água seja classificada como apta para as aplicações da norma (como lavagem de logradouros, pátios, garagens e áreas externas; lavagem de veículos; irrigação para fins paisagísticos; uso ornamental como fontes, chafarizes e lagos, etc.) seja 200 NMP/100mL de *Escherichia coli* (ABNT, 2019b).

O mais próximo que se tem em termos de aspectos legais voltado exatamente para o reuso de efluente sanitário tratado foi a proposta do Interáguas (2017). Em síntese, o Interáguas identificou lacunas no aspecto legal e normativo a nível federal e seu produto foi propor atendimento a essas lacunas que não são cobertas pelas legislações. Tem-se, então, a inclusão das definições e modalidades de reuso e, propostas de padrões de qualidade da água de reuso para cada uma dessas modalidades identificadas. Assim, contradições ou dúvidas entre uma resolução e outra, ou alguma norma, seria coberta. O objetivo final visa a proteção à saúde e ao meio ambiente.

É importante ressaltar que a discussão até aqui, neste capítulo, em termos de textos legais considerou somente os padrões de qualidade a serem atingidos. No entanto, para que a prática seja legal, é necessário que os processos de licenciamento e outorga sejam definidos, ou seja, definir se este processo será igual ou diferente ao processo existente para infraestruturas de água e esgoto sanitário.

Tabela 3 – Parâmetros de qualidade para reuso de água não potável

Parâmetros	Limite
pH	6,0 a 9,0
E. Coli	≤ 200 NMP/100mL
Turbidez	≤ 5 UT
$DBO_{5,20}$	≤ 20 mgO_2/L
Cloro Residual Livre	Mínimo 0,5mg/L – Máximo de 5,0 mg/L Recomendável 0,5mg/L – Máximo de 2,0 mg/L
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	≤ 2.000 mg/L ou
ou Condutividade elétrica[1]	≤ 3.200 µS/cm
Carbono orgânico total (COT)[2]	< 4 mg/L

[1] Os valores de condutividade apresentam correlação com sólidos dissolvidos totais.

[2] Somente para águas de rebaixamento de lençol.

Fonte: ABNT, 2019b.

A proposta do Interáguas (2017) não foi à frente por apresentar padrões muito restritivos, conforme mostrado na Tabela 4. O documento classifica dois tipos de reuso: urbano restrito e urbano irrestrito. Em suma, o reuso urbano irrestrito dispõe sobre irrigação paisagística e outros usos urbanos em áreas públicas, em que há trabalhadores e um potencial público exposto. Para o uso restrito, ficam expostos somente os trabalhadores.

A nível estadual, existem diversas resoluções específicas com definições acerca dos padrões de qualidade da água, e neste contexto, pode-se destacar a Resolução nº 005/2022 do Distrito Federal que estabelece diretrizes para aproveitamento ou reuso de água não potável em edificações no Distrito Federal (Distrito Federal, 2022). A resolução é bastante similar à NBR 16.783/2019 - Uso de Fontes Alternativas de Água Não Potável em Edificações (ABNT, 2019b).

Tabela 4 – Critérios mínimos para reuso urbano de acordo com as recomendações do Interáguas

Parâmetros	Limite
pH	6,0 a 9,0
Coliformes Termotolerantes	< 10^3 NMP/100mL[1] ou < 10 NMP/100mL[2]
Turbidez	< 5 UT
DBO	< 30 mg/L[1] ou <15 mg/L[2]
Cloro Residual Livre	Mínimo 1,0 mg/L

[1] Reuso Urbano Restrito – secundário + desinfecção.

[2] Reuso Urbano Irrestrito – secundário + filtração + desinfecção.

Fonte: Dados extraídos do Interáguas, 2017.

A Tabela 5 apresenta um compilado de alguns estados Brasileiros que possuem algum texto legal a respeito do tema. E como discutido, existem variações em termos de exigências determinadas por cada estado. Em São Paulo, por exemplo, a exigência para reuso irrestrito é de que o resultado da amostragem de Coliformes Termotolerantes seja não detectável, enquanto para o Rio Grande do Sul o limite é de 200 NMP/100mL para as mesmas modalidades de aplicações. Para os Estados do Ceará, Minas Gerais e as aplicações restritas

do Rio Grande do Sul o valor limite em coliformes termotolerantes é o mesmo, sendo estabelecido em 10^3 NMP/100mL.

No Estado do Rio de Janeiro, a Lei nº 9.043/2020 legaliza o uso do efluente tratado proveniente de ETEs para fins industriais (Rio de Janeiro, 2020a). O Decreto nº 47.403/2020 define reuso para fins urbanos como: utilização de água de reuso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil e combate ao incêndio (Rio de Janeiro, 2020b). No entanto, ambos não definem os limites de padrões de qualidade para o reuso no Estado.

Tabela 5 – Comparação entre os limites de qualidade da água de reuso apresentados nos textos legais estaduais

Texto legal	Limites para reuso	Modalidade
Resolução nº 005/2022 Distrito Federal	E. Coli < 200 NMP/100mL, Turbidez < 5 NTU, DBO 10 mg/L, Cloro Res. Livre entre 0,5 - 5,0 mg/L, SST 2000 mg/L	Descarga de bacias sanitárias e mictórios. Lavagem de logradouros, pátios, garagens e áreas externas. Lavagem de veículos. Irrigação para fins paisagísticos. Uso ornamental (fontes, chafarizes e lagos).
Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01/2020 São Paulo	Irrestrito – CT[1]: ND[2], Turbidez 2 NTU, DBO 10 mg/L, Cloro Res. Livre > 1,0 mg/L. Restrito - CT: 200 NMP/100mL, E. Coli: 120 NMP/100mL, SST 20 mg/L, DBO 30 mg/L, Cloro Res. Livre > 1,0 mg/L	Irrestrito: Irrigação paisagística, lavagem de locais públicos, desobstrução de tubulações, construção civil e combate ao incêndio. Restrito: exclusivamente a todos os anteriores, exceto combate ao incêndio.
Resolução CONSEMA nº 419/2020 Rio Grande do Sul	Irrestrito – CT: 200 NMP/10mL, Cloro Res. Livre < 1,0 mg/L Restrito – CT: 10^3 NMP/100mL	Irrestrito: Irrigação paisagística em locais com acesso irrestrito, lavagem de locais públicos e veículos. Restrito: Irrigação paisagística em locais com acesso restrito, abatimento de poeira, construção

Texto legal	Limites para reuso	Modalidade
		civil, ETEs e desobstruções de tubulações.
Deliberação Normativa CERH nº 65/2020 Minas Gerais	CT/E. Coli: 10^3 NMP/100mL	Lavagem de pátios, logradouros e outros espaços com exposição similar. Lavagem de veículos e descargas sanitárias.
Resolução COEMA nº 02/2017 Ceará	CT: 10^3 NMP/100mL	Irrigação paisagística, lavagem de locais públicos, desobstrução de tubulações, construção civil e combate ao incêndio.

[1] CT: Coliformes Termotolerantes.

[2] ND: Não Detectável.

Fonte: Dados extraídos de Santos, 2022.

1.2.2. Qualidade da água como requisito primordial para o reuso

O reuso da água consiste em adequar a qualidade de um efluente capitado ou coletado para seu uso almejado. Tendo em vista este fato, um dos pontos primordiais no início da concepção de projetos e estudos a respeito da aplicação do tema é saber quais níveis dos parâmetros de qualidade se deseja atingir. A partir deste ponto, definir as tecnologias e o que se consegue atender com elas e onde exatamente focar para atender parâmetros específicos. Ou seja, que tipo de água deseja-se produzir e qual arranjo tecnológico mais adequado para tal.

O principal ponto de destaque quando se trata de água de reuso, ou água reciclada, são os parâmetros de qualidade, conforme mostrado na Tabela 3. O padrão microbiológico é um importante parâmetro pois está associado a segurança da prática pelo fato dos esgotos apresentarem elevada carga patogênica. Atualmente, a regulação para produção de água potável (Portaria GM/MS 888/2021) apresenta indicadores para presença de coliformes, mais especificamente *Escherichia coli*.

O padrão turbidez no tratamento de água está relacionado a presença de sólidos em suspensão. No tratamento de esgoto, o parâmetro turbidez pode estar diretamente relacionado a interferência desses sólidos suspensos atuando como proteção dos micro-organismos à ação dos agentes de desinfecção. Sendo assim, a desinfecção de uma água residual como turbidez elevada pode ter a eficiência comprometida.

Em termos de processos, a filtração pode ser efetiva quando se trata de turbidez, pois através desse processo físico pode-se obter, indiretamente, a remoção de cistos de protozoários e ovos de helmintos, que são organismos com dimensões superiores às bactérias e aos vírus. Apesar destes fatores, a turbidez não se apresenta diretamente um indicador de qualidade microbiológica, visto que a remoção destes organismos se dá através de um conjunto de mecanismos.

Por exemplo, lagoas de estabilização ou *wetlands* são arranjos que apresentam processos (radiação solar, sedimentação, retenção física, etc.) que por sua vez contribuem para eliminação de vírus, protozoários e helmintos. Sendo assim, utilizar a turbidez como parâmetro de qualidade a ser acompanhado é possível quando se trata de sistemas de tratamento em que filtração e/ou desinfecção estejam presentes.

O cloro residual livre é um parâmetro utilizado como garantia de qualidade microbiológica da água de forma que a adição do agente oxidante tem objetivo de minimizar o potencial de recontaminação microbiológica da água. Esse parâmetro é avaliado não só com a concentração mínima do cloro livre presente na água, mas também com o tempo de contato. Ou seja, o limite mínimo da concentração de cloro livre é acompanhado do tempo de contato mínimo.

As condições citadas estão relacionadas aos padrões de qualidade para água potável. Quando se fala de aplicações agrícolas ou ambientais, não se deve estabelecer padrões para cloro residual livre tendo em vista que a presença do mesmo pode causar danos às plantas e ao meio ambiente.

Tratando-se da aplicação da água de reuso para irrigação, a salinização do solo é um fator importante a ser acompanhado. A condutividade elétrica, os sólidos dissolvidos totais e a razão de adsorção de sódio são parâmetros que se

referem ao aumento da concentração de sódio no solo, reduzindo a capacidade de infiltração da água. Neste sentido, as exigências de qualidade para as diversas aplicações de reuso de água em irrigações agrícolas não diferem daquelas já estabelecidas, independente da adoção ou não da água reciclada.

A demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos totais (SST) e pH embora sejam parâmetros importantes no tratamento de efluentes para a caracterização do mesmo, não são indicados como indicadores de qualidade da água de reuso. Isso se dá pelo fato de que os demais parâmetros, como principalmente microbiológicos, já estarem relacionados à qualidade exigida para estes.

Em termos de tecnologias, os sistemas convencionais compostos por etapas de gradeamento, decantadores primários ou UASB (reator anaeróbio de fluxo ascendente), biomassa suspensa ou biofilme, um sistema secundário por exemplo, não tem objetivo de remoção dos organismos patogênicos e desta forma requer posteriormente uma etapa de desinfecção para aplicações diversas (Von Sperling, 2014).

Lagoas de estabilização, dependendo dos diversos arranjos tecnológicos em que podem ser dispostas, podem produzir efluentes com diferentes qualidades. O sistema australiano, sendo lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa, produz um efluente similar ao efluente secundário (Von Sperling, 2014). Sendo assim, requer aplicação de um processo de desinfecção para a aplicação desejada. No entanto, segundo Von Sperling (2014), se o sistema for associado com lagoas de maturação em série ou lagoas de polimento em série, o produto gerado é de um efluente que apresenta boa qualidade quanto a desinfecção.

Processos de filtração avançada por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração ou osmose inversa) estão aptos a remover diferentes constituintes, além dos biológicos, por razão da sua porosidade. Para estes diferentes constituintes, pode-se citar, então, processo avançados para remoção de pigmentos e corantes (Monteiro, 2022), fármacos (Matin *et al.*, 2023; Das;

Sengupta, 2023; Taherpoor, 2023), sais de metais e sais de ânions, como sulfatos e cloretos (Karbassiyazdi *et al.*, 2023; Onchoke; Franclemont, 2022).

Apesar de a água de reuso não ser utilizada para aplicações potáveis, os riscos de contaminação microbiológicas de seres humanos precisam ser levados em conta. No entanto, caso utilizada para aplicações potáveis, existem os perigos de contaminação pelos diferentes compostos químicos que podem estar presentes.

2. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA E TECHNOLOGY ROADMAPPING METHOD (TRM)

Neste capítulo é apresentado o *Technology Roadmapping Method* (TRM) como a ferramenta de prospecção tecnológica escolhida para o planejamento estratégico utilizado na presente dissertação.

2.1. Ferramentas de prospecção tecnológica

Após a caracterização do efluente, existem diversas tecnologias e procedimentos para efetuar o tratamento sanitário efetivo e eficaz. Definir o melhor conjunto de operações é primordial para o sucesso dessas aplicações. Decisões importantes na escolha de um processo ou em um processo de inovação precisam ser suportadas por abordagens estratégicas. Chaisar e Garg (2021), por exemplo, destacaram duas abordagens muito utilizadas neste caso: avaliação de impacto ambiental e viabilidade econômica, e análise de decisão multicritério.

A tomada de decisão faz parte de um conjunto de ferramentas para abordagem estratégica, gestão e gerenciamento e planejamento de inovação. As últimas gerações têm sido marcadas pelo rápido avanço em termos de produtos e serviços, principalmente em tecnologias. Alinhar esses avanços à alcances sustentáveis é o principal objetivo das organizações atualmente. Neste ponto, é importante que as empresas se organizem de forma a escolher o melhor caminho ou alternativa para que seus objetivos de inovação sejam alcançados. Pode-se recorrer então aos métodos, ou ferramentas, de prospecção tecnológica.

Um planejamento sistemático que mapeia os desenvolvimentos tecnológicos e científicos para tomadas de decisão em indústrias ou corporações

caracteriza a prospecção tecnológica. Os métodos utilizados geralmente identificam os objetivos, organizam o panorama atual de uma determinada área, de forma qualitativa ou quantitativa, encontram as lacunas e o que pode ser realizado para supri-las, e definem um plano de ação a curto, médio ou longo prazo, dependendo do que se deseja.

A partir da prospecção, pode-se encontrar tecnologias, processos ou serviços promissores no mercado. Além disso, permitem projetar ações futuras e seus riscos baseado nas consequências de ações passadas ou presentes. Diversas ferramentas utilizadas para tomada de decisão são conhecidas. Geralmente são atreladas ou complementadas por ferramentas da qualidade. Pode-se destacar então, quatro técnicas de prospecção com diferentes abordagens: o *Brainstorming* e a Análise *SWOT* que podem ser utilizados para compor outras técnicas, a Análise Hierárquica de Processos (AHP) como ferramenta quantitativa e o *Technology Roadmapping* (TRM) como ferramenta qualitativa.

A técnica de *brainstorming* é muito conhecida e utilizada por ser de fácil aplicação. Consiste em reuniões em grupo para levantamento de informações e definições de objetivos a respeito do setor de interesse e assunto a ser trabalhado. Essa técnica pode ser aplicada em várias etapas de um planejamento estratégico, e tem como objetivo consolidar e organizar a “tempestade de ideias” (tradução literal) para os diversos cenários estudados (Buchele *et al.*, 2015).

A análise SWOT é uma técnica que define e examina os fatores internos (*Strenght* e *Weakness* - Forças e Fraquezas) e os fatores externos *(Opportunity e Threanten* - Oportunidades e Ameaças) de um negócio. Ela pode ser utilizada como um guia para a definição de um plano de ação no planejamento estratégico. Essa abordagem é útil, pois permite analisar o empreendimento sob diversas perspectivas de maneira simples e objetiva (Leite; Gasparotto, 2018).

A Análise Hierárquica de Processos (AHP) decompõe o problema (objetivo) em níveis hierárquicos de critérios e alternativas. No primeiro nível está o objetivo, no segundo nível os critérios e no terceiro nível as alternativas. Como é uma técnica quantitativa, as prioridades são definidas numericamente em uma escala

obedecendo uma consistência lógica. A comparação das alternativas é realizada par a par pelos avaliadores (funcionários, consultores, profissionais do setor, etc). No final de todo o processo a escolha é definida pela pontuação recebida (Chaisar; Garg, 2021).

Como alternativa qualitativa tem-se o *technology roadmapping*, método utilizado nesta dissertação. A ferramenta pode ser aplicada para planejamento, gerenciamento e inovação de serviços, produtos e tecnologias. Trata-se de uma técnica bastante flexível e objetiva que pode ser aplicada a empresas de pequeno, médio e grande porte. Empresas de destaque como Petrobras, Braskem e Embraer já utilizaram o método com sucesso (Oliveira *et al.*, 2012).

2.2. *Technology Roadmapping Method* (TRM)

Pode-se conceituar o *roadmapping* como uma ferramenta utilizada para identificação, definição de objetivo e mapeamento das estratégias a respeito do negócio ao qual está sendo aplicado. O objetivo central é integrar diferentes caminhos ou visões que conectem as camadas e respondam às perguntas base: “Onde estamos? Onde chegar? Como chegar?”. O produto final é um mapa que apresenta esses resultados, o *roadmap* (Oliveira *et al.*, 2012).

A utilização do *roadmapping* tem crescido muito nos últimos anos (Park *et al.*, 2020). O início de seu uso foi marcado oficialmente pela Motorola, apresentado no artigo científico publicado em 1987. A aplicação da estratégia fundamentou o planejamento de novos produtos e tecnologias para a marca, e foi neste estudo que o *technology roadmapping* começou a ser referenciado pela sigla TRM (Oliveira *et al.*, 2012). Atualmente, na área da Engenharia Química, já existem publicações utilizando o método (Monteiro, 2022; Daás, 2021).

Desde a aplicação da ferramenta com a Motorola o *roadmap* foi popularizado para diferentes indústrias e adaptado para diversos objetivos. Kerr e Phaal (2020) destacaram as chamadas “raízes industriais estabelecidas”. Isso

significa que independente do *roadmapping* (de tecnologia, produtos, negócios ou estratégico), suas raízes estão na engenharia industrial.

De acordo com o levantamento de arquivos por Kerr e Phaal (2020), existiram práticas que constituem um *roadmapping* anteriores a 1960. No entanto, seis organizações têm reconhecimento importante devido às contribuições a respeito do *roadmapping* e publicações formais, sendo influentes na aceitação e interesse de outras organizações: Motorola em 1987, BP em 1995, Philips em 1997, EIRMA em 1997, *Semiconductor Industry Association* (SIA) em 1999 e Lucent Technologies em 2003 (Kerr; Phaal, 2020).

O aumento do interesse acadêmico nos processos de TRM tem sido apresentado em diversas revisões realizadas nos últimos anos, principalmente no desenvolvimento de técnicas e fatores críticos para o sucesso do método (Carvalho *et al.*, 2013). Segundo Carvalho et al. (2013), o interesse do *roadmapping* pelos pesquisadores tem aumentado devido também ao aumento do interesse das empresas na aplicação do TRM, o que resultou em muitas publicações de estudos de caso a respeito do tema.

Em um período de 20 anos, diferentes escolas de pensamentos surgiram a respeito do TRM, e Park et al. (2020) destacam sete: a escola prática de Cambridge, a escola de Seul, de Portland, de Bangkook, a escola fenomenológica de Cambridge, de Pequim e de Moscou. Essas escolas diferem em alguns pontos, como orientação para pesquisa (orientada para solução ou para teoria), os métodos de pesquisa e as fontes utilizadas (qualitativos ou quantitativos) e a natureza das contribuições que as escolas utilizam.

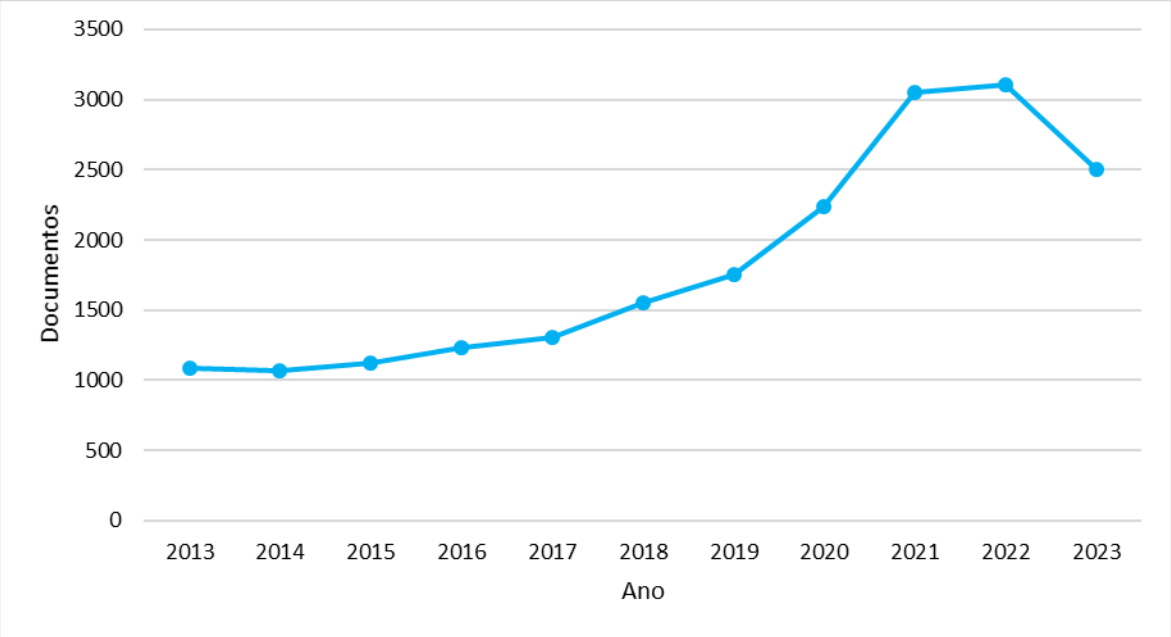
Em termos de publicação, a *Technological Forecasting and Social Change* é um destaque (Park *et al.*, 2020). Segundo os autores, com o aumento do interesse no uso e nos estudos sobre o TRM, a revista tem servido como principal veículo de informações a respeito visto o número de artigos publicados sobre o tema.

De forma a corroborar as afirmações de amplo e crescente uso do TRM presente na literatura, realizou-se uma busca na base *Web of Science* uma vez que outras bases, como *scopus* por exemplo, utilizado na presente dissertação,

são localizados no processo de busca (Carvalho *et al.* 2013; Alcantara; Martens, 2019). Além disso, permite visualizar diversos indicadores, como revistas, áreas de concentração, autores e etc.

A pesquisa resultou em um total de 35.542 documentos utilizando todos os campos de busca e "*technology roadmapping OR roadmap*" como palavras-chave. De fato, na Figura 4 é possível notar o aumento das publicações que consideram a ferramenta. Ao aplicar o filtro para artigos e revisões o resultado total reduziu para 25.928, maior parte dos documentos.

Figura 4 – Evolução temporal das publicações sobre *roadmap* na base *Web of Science*



Fonte: dados obtidos no *Web of Science*, 2023.

As 10 principais categorias de publicação estão apresentadas na Tabela 6 e seguida destas encontram-se "Gerenciamento" e "Tecnologias Científica Sustentável Verde". Engenharia, física, ciência dos materiais e da computação são as categorias de maiores incidências, com maiores números de publicações no total. Para a categoria Engenharia Química foram obtidos 323 artigos e 334 para Engenharia Ambiental.

Após aplicação de filtros e análise dos artigos selecionados sobre TRM, os principais artigos sobre o foram da University of Cambridge, Seoul National University, Mahidol University e portland State University. A Universidade de São Paulo também é destacada. Maior parte dos artigos da Inglaterra, Coreia do Sul, USA, China e Brasil em sétimo. Os principais autores são Phaal, R., Park, Y., Gerdsri, N., Probert, D. R., Lee, S. e Farrukh, C. J. P. com cerca de 50% dos artigos.

Tabela 6 – 10 principais categorias de publicação sobre *roadmap* no *Web of Science*

Campo: Categorias Web of Science	Contagem de registros	% de 25.928
Ciência dos Materiais Multidisciplinar	1.518	5,855%
Física Aplicada	1.471	5,673%
Engenharia Elétrica Eletrônica	1.410	5,438%
Ciencias ambientais	1.257	4,848%
Ciências Multidisciplinares	1.203	4,640%
Combustíveis Energéticos	1.026	3,957%
Química Multidisciplinar	947	3,652%
Bioquímica Biologia Molecular	946	3,649%
Saúde Ocupacional Ambiental Pública	855	3,298%
Nanociência Nanotecnologia	849	3,274%

Fonte: Tabela retirada do *Analyze Results*, no *Web of Science*, 2023.

Para consolidar o assunto sobre a ampla aplicação do TRM, em 2011, o *Centre for Technology Management* da Universidade de Cambridge publicou um documento em que foram apresentados diversos *roadmaps* de domínio público. O documento conta com mais de dois mil *roadmaps* organizados por tópicos nas

mais diversas áreas, como por exemplo química, energia, saúde, política, transporte, materiais etc. (Phaal, 2011).

2.3. O processo de *roadmapping*

Technology roadmapping é um método de planejamento e gerenciamento que, apesar de flexível, tem uma abordagem estruturada. Geralmente não é abordado o método nos livros de estratégia por carregar "*technology*" no nome. No entanto, o método ganha destaque quando consegue alinhar investimento, tecnologia, desempenho e funcionalidades prospectivas e expectativas comerciais (Kerr; Phaal, 2022).

O *roadmapping* pode ser aplicado a diversos contextos, tanto para negócios quanto para inovação. Quando voltado para estratégias de inovação o *roadmap* se organiza em termos de mercado, produtos e tecnologias voltados para descrever tendências de inovação. Quando voltados para produto e tecnologia geralmente é utilizado para estabelecer requisitos de desempenho técnico e posicionamento comercial específicos. Normalmente, esse tipo é utilizado por negócios, não sendo diretamente indicados para níveis multiorganizacionais (Oliveira *et al.*, 2012).

Oliveira *et al.* (2012) destacaram alguns benefícios ao utilizar *roadmapping* no planejamento estratégico e de inovações:

- Promove alinhamento entre estratégia comercial e tecnológica permitindo a integração entre novas tecnologias e os negócios;
- Identifica oportunidades para inovações com exploração de novos recursos, tecnologias e produtos;
- Permite integração entre setores e grupos dentro da organização, melhorando a comunicação e colaboração entre eles;

- Define estratégias e objetivos comuns entre os setores da organização;
- Melhora o processo de tomada de decisão devido ao visual objetivo e sistemático do *roadmap*.

Existem dois componentes principais na ferramenta do TRM: o *roadmap*, que é o mapa de resultados, ou seja, a estrutura que apresenta os caminhos possíveis, oportunidades e desafios a serem contornados. E, o processo de *roadmapping* que consiste no desenvolvimento do mapa, desde a formação de uma equipe, se for necessário, passando pela preparação, estudo e levantamento de informações, e finalizando na consolidação das mesmas (Oliveira *et al.*, 2012).

2.4. Estrutura e arquitetura do TRM

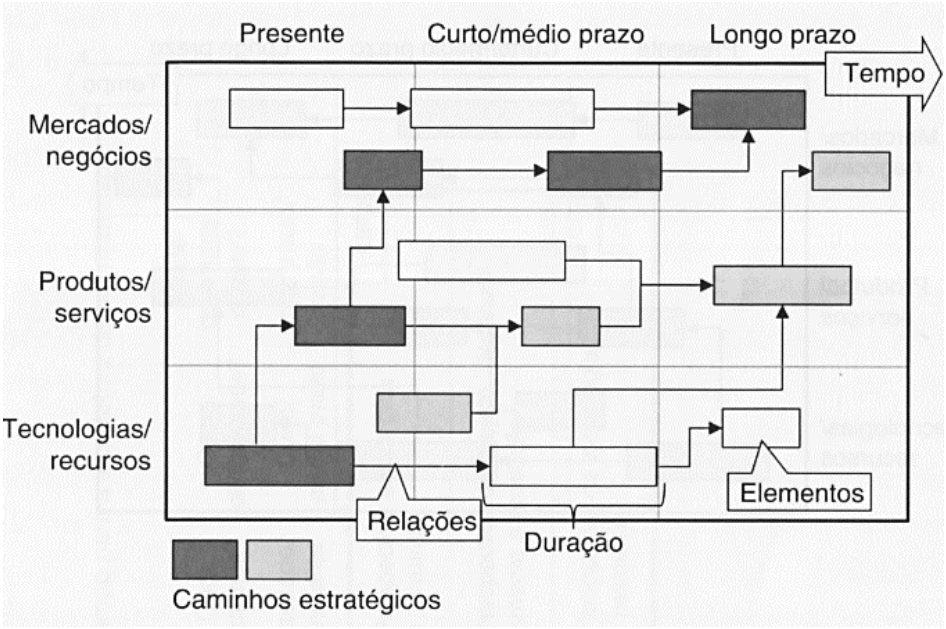
De maneira geral, o *roadmap* pode ser entendido como um gráfico com um eixo de dimensão de tempo em que diferentes camadas (mercado, produto e tecnologia, por exemplo) são conectadas de formas contínuas ou descontínuas. Assim, é possível relacionar e explorar tendências e evoluções, e reunir temas-chave da literatura e transições de tecnologias (Phaal *et al.*, 2004).

Por ser um método flexível, existem diversas camadas que podem ser utilizadas, assim como diferentes linhas do tempo. Isso faz com que o *roadmapping* se adapte à aplicação desejada. O mapa obtido ao fim do processo precisa transmitir a estrutura das informações e as relações entre os elementos contidos no *roadmap*. Isso é definido pelo posicionamento e duração de cada elemento, como apresentado em exemplo pela Figura 5.

As relações entre as informações, camadas e tempo formam os caminhos estratégicos. Segundo Oliveira *et al.* (2012), dois tipos de caminhos estratégicos podem ser destacados: as estratégias “puxada para o mercado” (*market-pull*), em que a inovação é justificada por demandas de mercado a serem supridas; E

“empurrada pela tecnologia” (*technology-push*) em que a base de inovação são as tecnologias que, neste caso, empurram o mercado.

Figura 5 – Camadas, tempo, elementos e caminhos estratégicos de um *roadmap*



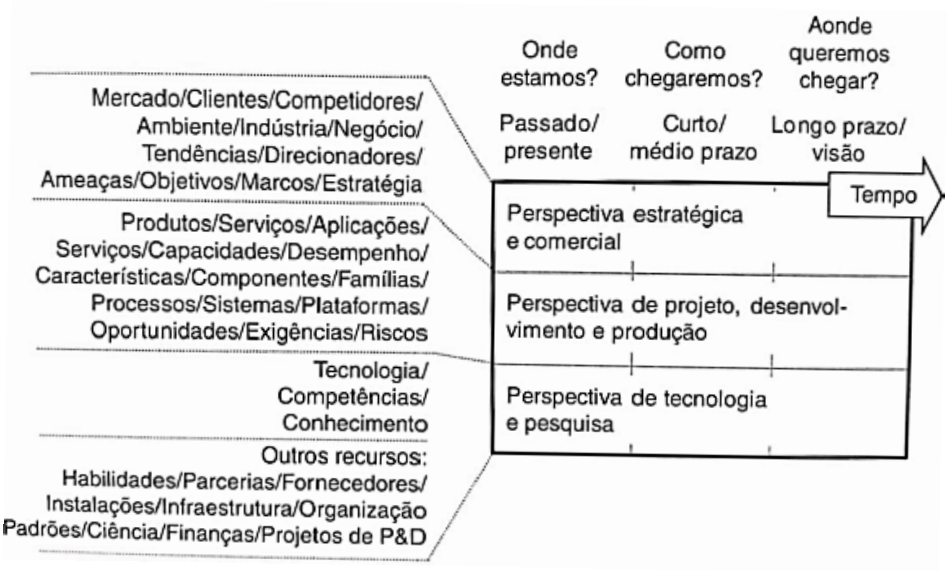
Fonte: Oliveira *et al.*, 2012.

Definido o tipo de estratégia, as perguntas que compõem as linhas do tempo e camadas são as perguntas fundamentais do *roadmap*. Na matriz, Oliveira *et al.* (2012) definem as perguntas fundamentais da linha das camadas em: “por quê?” que identifica uma espécie de SWOT, oportunidades e ameaças externas e forças e fraquezas internas, definidos na primeira camada. “O quê?” que define produtos, serviços ou aplicações, segunda camada. E “como?” que especifica como desenvolver e entregar o “o quê?” planejado, terceira camada.

Na linha do tempo as perguntas respondidas são: “onde estamos?” que apresenta como resposta uma visão da situação atual e é o primeiro passo para definição das estratégias e demais ações. “Aonde queremos chegar?” que define a estratégia a longo prazo, e “como chegar?” referente ao caminho para alcançar o objetivo final, ou seja, ações a curto e médio prazo. Esta última pode ser considerada uma das seções mais importantes da matriz de *roadmapping* (Oliveira *et al.*, 2012).

Diversos exemplos de camadas e linhas do tempo podem ser combinados para compor o *roadmap*. O importante é que incorpore os objetivos e contexto das aplicações. A Figura 6 apresenta os exemplos de camadas que podem ser utilizadas e como a linha do tempo responde às perguntas principais sobre a estratégia.

Figura 6 – Exemplo para composição de camadas e linhas do tempo do *roadmap*



Fonte: Oliveira *et al.*, 2012 adaptado de Phaal *et al.* 2004.

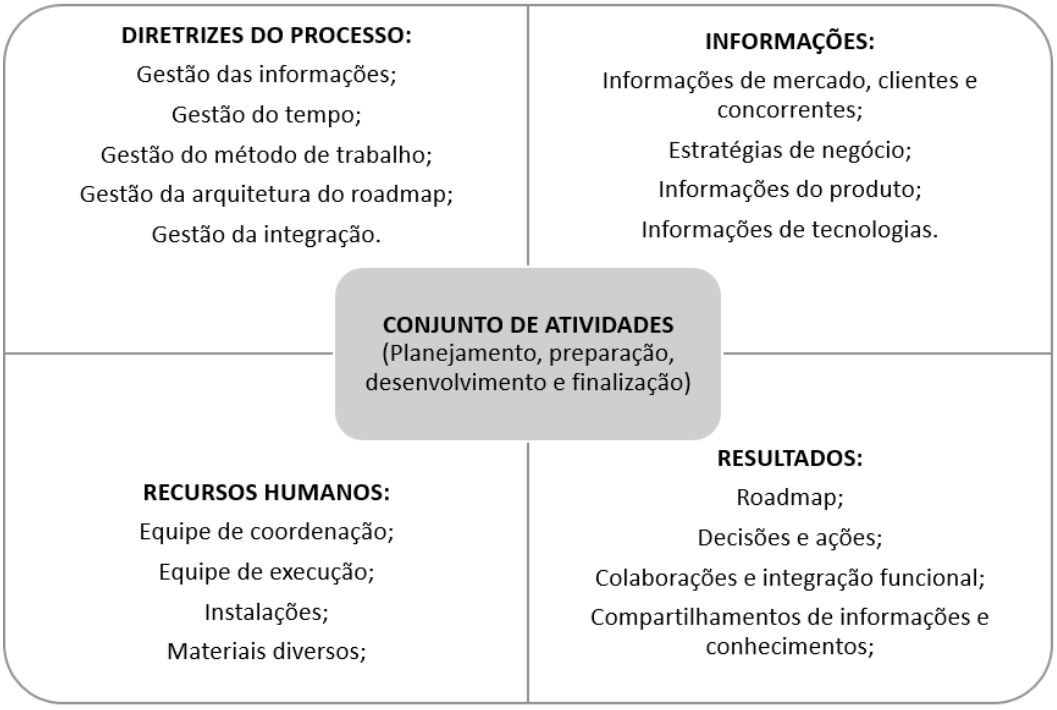
Os *roadmaps* devem transmitir uma linguagem visual. É o resultado do trabalho colaborativo que apresenta caminhos de ações conjuntas (Phaal *et al.*, 2009). Assim, vários componentes gráficos podem complementar a estrutura do *roadmap*, como formas, cores, tamanhos e símbolos. Não existe uma maneira fixa de apresentar os componentes, mas a linguagem visual faz parte do processo de *roadmapping* (Oliveira *et al.*, 2012).

2.4.1. Processo de aplicação do TRM

O *roadmapping* tem duas partes principais em sua abordagem: o mapa obtido ao fim do processo e o processo de *roadmapping* em si. Esse processo é valioso visto que é nele que as ferramentas, informações e planejamento são desenvolvidos e aplicados a fim de se chegar ao resultado. Como cada *roadmapping* desenvolvido por diversas empresas e companhias tem suas particularidades, neste tópico será apresentado o conceito geral do processo de aplicação utilizado por Oliveira *et al.* (2012).

O processo de *roadmapping* é composto por seis elementos primordiais: o conjunto de atividades, as partes interessadas, informações, diretrizes do processo, os resultados e principalmente os recursos humanos e físicos. Como apresentado na Figura 7, as cinco partes compõem o conjunto de atividades que serão desenvolvidas ao longo do processo.

Figura 7 – Elementos que conduzem o processo de *roadmapping*



Fonte: Adaptado de Oliveira, M. G. De *et al.*, 2012.

O conjunto de atividades pode ser dividido em 4 partes: planejamento, preparação, desenvolvimento e finalização. A oportunidade ou necessidade é o ponto de partida do *roadmapping*, de onde se inicia o planejamento. Essas 4 etapas funcionam como um ciclo até que todo o processo de *roadmapping* termine. As partes interessadas são quem tem interesse no resultado do TRM, podendo ser interno ou externo ao desenvolvimento do TRM.

As informações são a chave para o processo. No TRM, por exemplo, uma informação crucial são quais as tecnologias hoje disponíveis e utilizadas e quais têm se tornado essenciais no mercado. De modo geral, o elemento “informação” depende da arquitetura e objetivo do *roadmapping*. Oliveira *et al.* (2012) destacam algumas informações importantes para dispor em um TRM:

- Panorama da situação atual de cada camada;
- Descrição dos objetivos estratégicos da aplicação;
- Situação atual e perspectiva futura do mercado;
- Situação atual dos portfólios de tecnologias e produtos;
- Previsão de novas tecnologias com potencial importante.

O elemento “diretrizes do processo” definem como deve ser realizada a gestão da execução do TRM. Considera-se então a gestão das informações: como serão coletadas, organizadas e analisadas. A gestão do tempo: período de cada fase do processo de TRM. Gestão do método de trabalho: por exemplo, fase exploratória para criação de contexto e fase conclusiva, com objetivo de delimitar, priorizar assuntos e ideias e tomar decisões. Gestão da arquitetura do *roadmapping* e gestão da abordagem (ligação entre as entradas e saídas do *roadmap*).

O elemento “resultado” consiste no mapa final, o *roadmap*. A partir dele obtém-se o relatório do processo completo, informações levantadas, ideias e conclusões. Por isso a etapa de arquitetura do TRM tem grande importância, pois

permite controlar e garantir resultados na definição das camadas e subcamadas e significados do eixo do tempo. Por fim, os recursos humanos e físicos que são referentes à equipe responsável pelo TRM e os recursos utilizados para tal.

Borschiver e Silva (2016) apresentaram uma metodologia para a construção de TRM generalizado é dividida em três etapas: etapa pré-prospectiva, etapa de prospecção e pós-prospectiva:

- Etapa Pré-prospectiva: identificação do tema, estado da arte que permite que os principais conceitos sejam delineados e definição de estratégias e objetivos.
- Etapa Prospectiva: pesquisa direcionada e resultados de buscas. Os documentos levantados, como patentes, artigos e relatórios, podem ser organizados em uma planilha, analisados e tratados de forma macro (ano de publicação, autores, tipo...), meso (divisões de informações importantes utilizando taxonomias que permitam identificar tendências) e micro (taxonomia com maior detalhamento e particularidades).
- Etapa Pós-prospectiva: elaboração do *roadmap* (organização das informações de acordo com a taxonomia e alocação temporal – curto, médio ou longo prazo) e relatório conclusivo.

A abordagem do TRM por Borschiver e Silva (2016) será utilizada como base para cumprir os objetivos da presente dissertação.

2.4.2. Fontes de informações tecnológicas: artigos científicos e patentes

A pesquisa científica se constitui em um trabalho de investigação conduzido por um método científico. O resultado dessa investigação é o

conhecimento acumulado sobre um determinado fato ou fenômeno, conhecido como informação científica (Borschiver; Silva, 2016). A informação tecnológica diz respeito a todo conhecimento que em sua aplicação favoreça o avanço “na forma de aperfeiçoamento e inovação”, segundo a FID – Federação Internacional de Documentos.

Artigo científico é um veículo de transmissão de conhecimentos (e informação científica), original e de qualidade, entre pesquisadores sendo utilizados como base para embasar estudos já existentes e motivar novas pesquisas. Em contrapartida, o desenvolvimento tecnológico (informação tecnológica) decorre dos documentos de patentes. São as patentes o indicador de inovação capaz de medir os resultados das pesquisas em desenvolvimento, a produtividade de uma técnica e estrutura de tecnologia específica (Borschiver; Silva, 2016).

Assim como os artigos científicos carregam o nome dos seus autores, ano e local de publicação de forma a assegurar a autoria de quem escreveu, a patente é um documento de propriedade a fim de proteger a criação, outorgado pelo estado. No Brasil, a Lei nº 9.279/1996 – Lei da Propriedade Industrial Brasileira, garante o direito de patente a uma invenção/modelo que atendam requisitos determinados. Os prazos da patente podem variar de 15 a 20 anos (Brasil, 1996; Monteiro, 2022).

Conforme dito, as tendências tecnológicas podem ser definidas através das pesquisas em bases de patentes. A padronização das bases de dados em que elas se encontram ajudam a tratar estatisticamente uma massa de dados (documentos) com baixos desvios. De acordo com Borschiver e Silva (2016), o número de patentes é considerado um indicador da capacidade de um país transformar o conhecimento científico em produto/resultado/método tecnológico. Isso permite uma aproximação razoável a respeito das atividades de inovação do país.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado a metodologia utilizada na elaboração da presente dissertação e do *technology roadmapping* utilizada neste trabalho – assim como a arquitetura do *roadmap*. A estrutura utilizada é apresentada detalhadamente, com as camadas e subcamadas definidas para a organização da estrutura do mapa final.

3.1. Metodologia do *Technology Roadmapping*

O TRM foi estruturado em três etapas: planejamento, *workshops* e implementação (Borschiver; Silva, 2016). Essas etapas, principalmente os *workshops* são realizados por equipes responsáveis e de coordenação e execução, ou seja, pessoas envolvidas em cada etapa. Apesar de ser uma ferramenta em que um grupo (recursos humanos) é definido dentro da organização para realizar o *roadmapping* (Oliveira *et al.*, 2012), foi possível que o método tenha sido aplicado de forma individual e orientada (Daás, 2021).

A busca preliminar ou etapa pré-prospectiva foi o primeiro passo da elaboração do *roadmap*. Esta etapa foi realizada para se ter um conhecimento básico sobre o tema a ser trabalhado. Como não é necessário que as buscas realizadas nesta fase sejam em bases especializadas – busca aleatória de forma a orientar o primeiro contato com o assunto – foram realizadas algumas pesquisas em sites de fornecedores, sites de buscas e sites sobre meio ambiente. Foi criado, então, uma base com os principais conceitos, com a definição da abordagem utilizada e orientação para as buscas de documentos das etapas seguintes.

Na etapa prospectiva foi definida a base de dados especializada e realizada a busca direcionada das informações utilizando como alicerce o

conhecimento obtido na etapa anterior. A busca dos documentos técnicos como patentes e artigos compôs a etapa e sua organização. Seguindo a metodologia de Borschiver e Silva (2016) esta fase foi dividida em outras duas: a busca orientada (definição da estratégia) e a organização das informações (análise dos resultados).

Na busca orientada o perfil da estrutura do *roadmap* foi construído, ou seja, quais as informações se desejava obter e qual a relação entre essas informações. O resultado foi sintetizado em função do tempo. O período de tempo foi classificado em quatro etapas: estágio atual (ano zero), curto prazo, médio prazo e longo prazo.

Para cada etapa do eixo temporal foi adotado um intervalo de 10 anos para delimitar o tempo entre curto, médio e longo prazo. Para o ano zero foram analisados artigos especializados, sites de empresas, organizações governamentais ou não que apresentaram tecnologias e ações atuais. A curto prazo foram analisadas as patentes já concedidas, logo mais próximas à fase comercial. A médio prazo, as patentes solicitadas e a longo prazo os artigos científicos visto que ainda estão em fase de estudo acadêmico.

A metodologia para organização das informações foi dividida em três níveis: nível macro, em que são levantadas as informações imediatas como empresa ou universidade, título, ano e autor; nível meso, em que se faz a leitura dos resumos para extrair informações mais específicas como processo, equipamentos e aplicação; e nível micro, em que dentro das classes definidas no nível anterior são extraídas informações mais detalhadas caracterizando a taxonomia dos assuntos identificados.

Por fim, a etapa pós-prospectiva estruturou as informações anteriores na forma de um mapa. O eixo vertical do *roadmap* foi composto pelas camadas criadas a partir da taxonomia construída. No eixo horizontal foi disposta a evolução temporal nas quatro etapas. As informações foram distribuídas de forma gráfica permitindo uma conexão entre camadas e também entre os períodos de tempo.

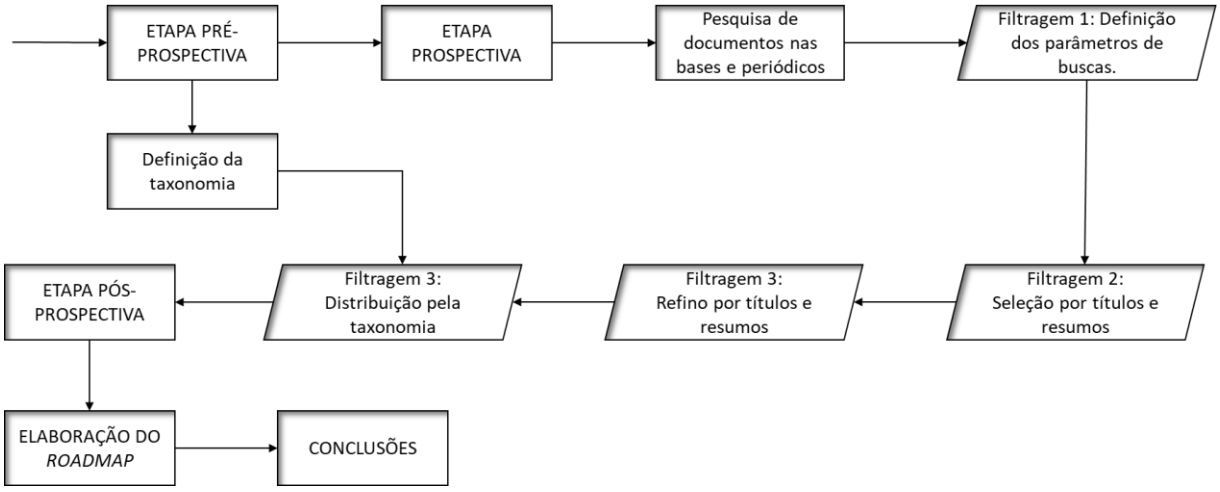
A fase de análise dos documentos, melhor detalhada no subtópico 3.4.2, é

de suma importância, pois consistiu na verificação da relevância dos dados coletados. A interpretação precisa ser feita de forma a agregar valor. Quando utilizado a nível empresarial/industrial, essa prospecção de tecnologia por meio das pesquisas (artigos e patentes) é de extrema utilidade para inferir a respeito do estado da arte de um setor específico. O objetivo foi gerar informações sobre as tendências de mercado.

3.2. Metodologia da pesquisa

O fluxograma da Figura 8 apresenta a metodologia do desenvolvimento da dissertação. Pode-se dividir nas etapas:

Figura 8 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: Autora, 2022.

Buscas a respeito da situação atual quanto à coleta e tratamento de esgoto; Buscas iniciais a respeito do tema compondo: a etapa pré-prospectiva do *roadmapping*; Etapa de prospecção tecnológica; Etapa pós-prospectiva e conclusões;

3.3. Metodologia para elaboração do *technology roadmapping*

A construção da dissertação tem por base a aplicação do *technology roadmapping* e suas etapas obtendo como resultado o *roadmap*, o qual permite de maneira qualitativa definir as tendências de tecnologias para o tratamento de esgoto em municípios com baixa geração. A metodologia utilizada aqui foi baseada nas referências citadas no Capítulo 2 desta dissertação, como Phaal (2004), Oliveira *et al.* (2012) e Borschiver e Silva (2016).

Como trata-se de uma pesquisa observacional, qualitativa e bibliográfica, é importante que as etapas de execução do trabalho sejam ordenadas quanto ao: planejamento da investigação sobre o tema, desenvolvimento do método de aplicação, coleta e organização dos dados e informações, análise dos resultados e conclusões obtidas.

3.3.1. Etapa pré-prospectiva

Nessa etapa realizou-se uma pesquisa preliminar para embasamento teórico e levantamento de informações sobre o tema em diversas bases, sites e trabalhos. As estratégias para elaboração do *roadmap* foram traçadas com o intuito de identificar como os processos de tratamento de esgoto estão evoluindo, permitindo assim um direcionamento para a pesquisa. Conduziu à elaboração da revisão bibliográfica sobre o tema, sendo então definidos os objetivos apresentados

Sendo assim, esta etapa foi de suma importância para obtenção do embasamento necessário e definições de buscas nas bases de patentes e artigos científicos. Além disso, a etapa contribuiu para a definição dos objetivos geral e específicos da dissertação. Toda esta etapa pré-prospectiva teve como finalidade analisar as principais alternativas para reutilização da água tratada.

3.3.2. Etapa prospectiva

A etapa prospectiva é definida pela busca direcionada. Esta foi composta pelas informações obtidas nos documentos de patentes e pesquisas nas bases de artigos científicos e análise dos resultados obtidos nesse levantamento de dados. A busca de patentes e pedidos de patentes foi realizada na base de dados online *Espacenet* da União Europeia (worldwide.espacenet.com) e o WIPO Patentscope. Os artigos serão analisados pela busca realizada na base *Scopus*.

As buscas foram delimitadas por um período de tempo de 10 anos para alocação das tecnologias ou processos dentro do eixo horizontal do *roadmap*. A organização dos documentos para posterior análise foi dividida de acordo com sua alocação temporal, conforme mostrado a seguir:

- **Curto prazo**: neste primeiro estágio da evolução temporal foram alocados os documentos e tecnologias obtidas nas buscas de patentes concedidas, encontradas na base de busca citada.
- **Médio prazo**: este segundo estágio correspondeu aos pedidos de patentes que estão sob análise ou ainda não concedidas. A alocação em termos de médio prazo diz respeito ao fato de que depende de sua aprovação para início da aplicação da tecnologia.
- **Longo prazo**: no estágio da evolução temporal foram alocados os artigos científicos. Como justificativa, entende-se que as tecnologias e informações contidas nos artigos se apresentam em fase inicial de desenvolvimento, sendo ainda conteúdo de pesquisa.

Na etapa de análise dos resultados foi realizada a leitura dos documentos encontrados no levantamento feito nas etapas de busca. Por intermédio desta busca direcionada, os documentos foram organizados em um modelo de planilha de forma a auxiliar na organização das informações. A partir da leitura, as informações extraídas serão analisadas em três níveis: macro, meso e micro:

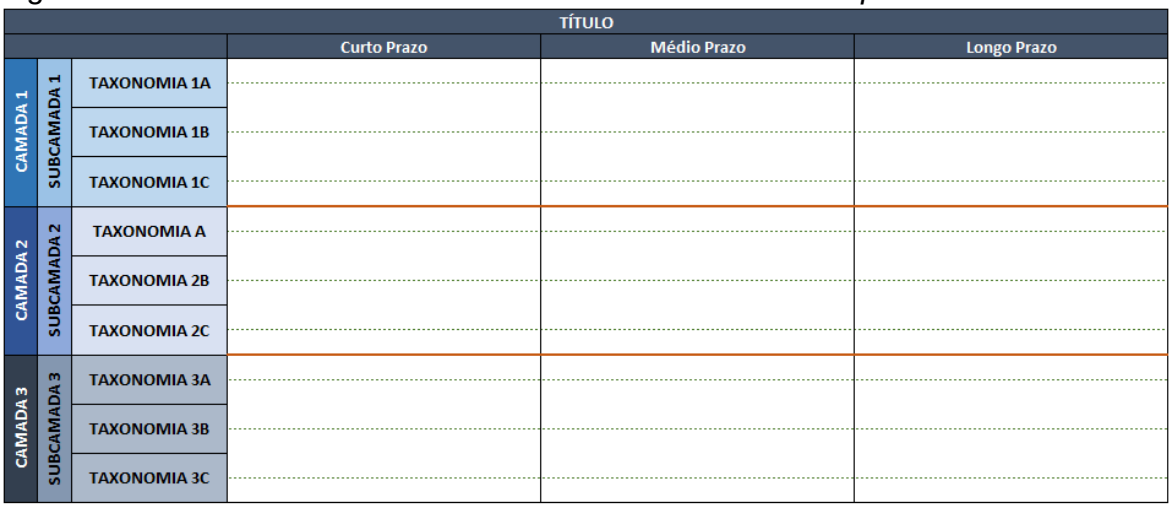
- **Nível macro**: em um primeiro momento os documentos foram organizados quanto aos autores, ano, país, palavra-chave, assunto e objetivo.
- **Nível meso**: através de um segundo filtro feito após a leitura dos resumos, esses documentos foram alocados de acordo com suas taxonomias, que será definida a frente – em que os aspectos importantes são destacados.
- **Nível micro**: os documentos foram direcionados a uma terceira etapa em que as informações em termos de tecnologias, equipamentos e processos são melhor detalhadas.

3.3.2.1. Taxonomia: aspectos mais relevantes

Com a leitura dos documentos e informações encontradas nas fases pré-prospectiva e prospectiva, foi definida a estrutura do *roadmap*. Esta estrutura corresponde à organização das informações em camadas e subcamadas a qual permite, através do *roadmap* finalizado, analisar os fluxos de tecnologias e processos encontrados.

Essa organização, chamada taxonomia, está mostrada na Figura 9. Ela é de suma importância para organização dos dados, de forma que seja possível visualizar as tendências do estudo. O detalhamento da mesma também é feito em níveis macro, meso e micro.

Figura 9 – Estrutura das camadas e subcamadas do *roadmap*



Fonte: Autora, 2024

Toda a pesquisa e organização dos documentos e tecnologias foi então feita com base na taxonomia definida para o *roadmap* de estudo. Assim, com base nas pesquisas realizadas e sites de fornecedores, estatísticas de órgãos ambientais, artigos e patentes, a taxonomia foi criada com base nas informações pertinentes.

A definição da taxonomia:

I. **A nível macro**: definiu-se o *roadmap* de tecnologia a respeito do tema, que abrange camadas de MERCADO, PROCESSO e TECNOLOGIA.

II. **A nível meso**:

   a. Tendências e direcionadores.
   b. Processo de tratamento;
   c. Tecnologia de tratamento.

III. **A nível micro**:

   a. Tendências e direcionadores:

- Tecnologia/Equipamento: trata-se da apresentação de uma tecnologia específica ou um equipamento do qual se discute as demais características.
- Arranjo tecnológico: conjunto de equipamentos e operações associados que garantem o processo como um todo. Dessa forma, o *roadmap* aponta se a tendência está nos arranjos de processos ou elaboração de novas tecnologias de operações/processos.
- Redução de custos: processos que possuem baixo consumo energético ou reaproveitamento do mesmo, geração baixa de lodo ou resíduos reduzindo gastos de transporte e condicionamento e baixa taxa de manutenção.
- Impacto ambiental reduzido: principalmente processos com baixa emissão de gases ou geração de lodo, com reutilização de recursos resultando em diminuição do impacto ambiental.
- Eficiência de tratamento: sinalizados os processos que atingem eficiência na remoção de DBO/carga orgânica acima de 90%.
- Aplicabilidade: importante sinalizar processos que podem ser aplicados a baixos e/ou altos volumes. Isso pode estar em concordância com espaço requerido para alocação. Considerou-se nesta dissertação baixos volumes tratamentos centralizados em localidades de até 50mil habitantes.

b. Processo de tratamento:

- Biológico: algas, vegetais e demais plantas; microbiologia ou agentes microbiológicos.
- Bio-sólido: grânulos de biomassa ou similares.
- Químico: utilização de agentes químicos, como coagulantes, desinfetantes ou produtos utilizados como fonte oxidante.
- Físico: operações unitárias, como por exemplo filtração, decantação, centrifugação e etc.
- Material sintético: polímeros artificiais ou outro material que funcione como meio suporte ou substâncias sintéticas aplicáveis.

c. Tecnologia de Tratamento

- Osmose reversa: tecnologias ou arranjos em que o ponto focal seja tratamento via osmose.
- Filtração em membranas: novos materiais membranosos ou sistemas aplicados em micro, nano e ultrafiltração.
- Reator/biorreator: tecnologias ou arranjos em que o ponto focal seja tratamento em reatores.
- Filtração: enquadra-se demais operações de filtração que não sejam filtração por membranas, como filtros biológicos ou filtros de camadas.
- Adsorção: processos de tratamento que se tratam de adsorventes ou materiais adsorventes desenvolvidos para o tratamento de esgoto.
- Estabilização e variações: todas as modalidades de lagoas (aeróbia, anaeróbias, facultativas, maturação e etc.).
- Lodos ativados: todos os processos com aplicação de lodo ativado com recirculação ou não.
- Desinfeção: tecnologias ou arranjos em que o ponto focal seja tratamento via desinfecção ou apresente a desinfecção como etapa importante no arranjo como um todo.

3.3.3. Etapa pós-prospectiva

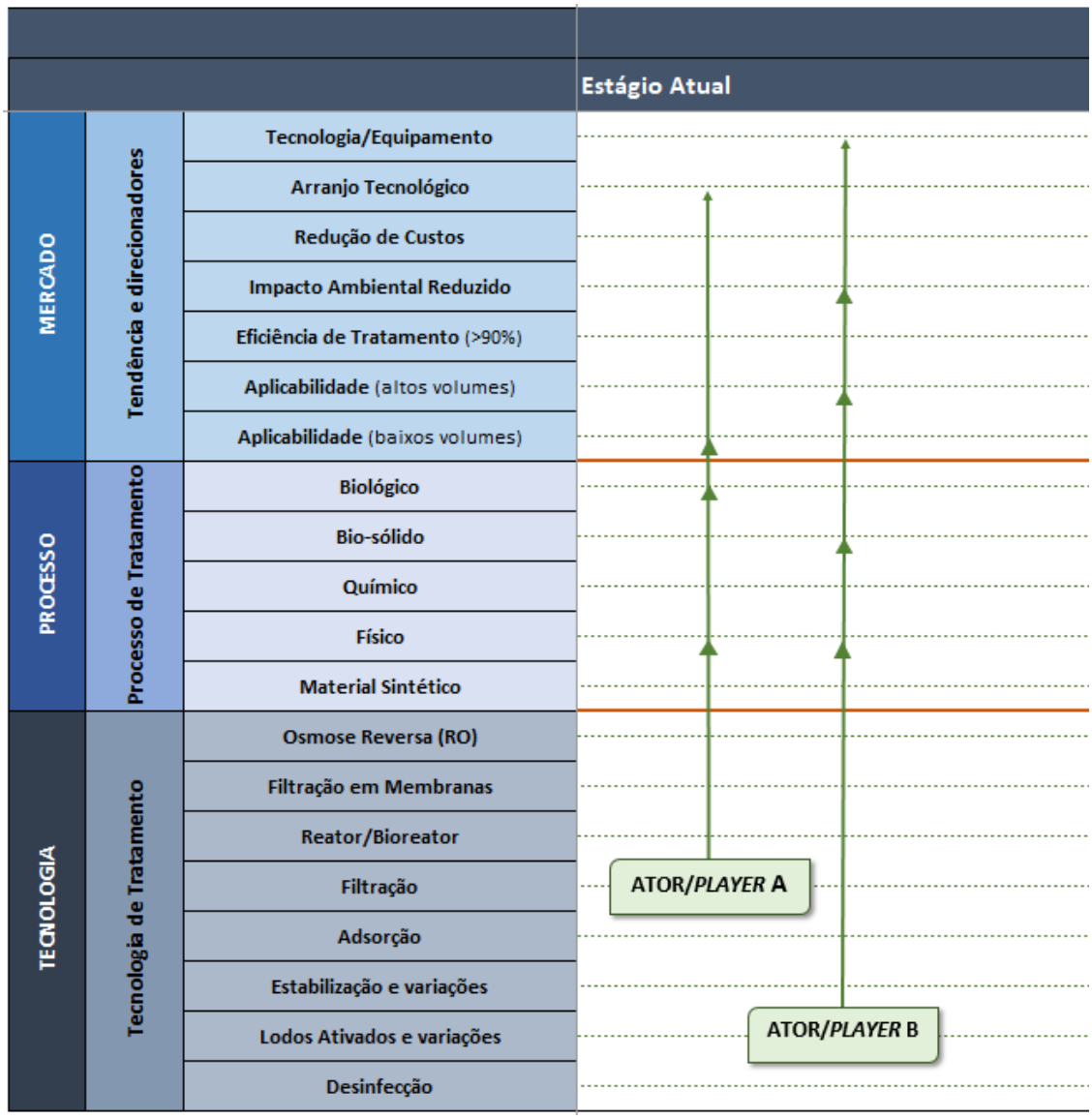
Corresponde à etapa final do trabalho, caracterizada pela elaboração e análise do *roadmap* e conclusão. A elaboração do *roadmap* foi realizada tendo por base os resultados encontrados na fase prospectiva, em que o conhecimento se converte em inteligência visual (Monteiro, 2022). A estrutura do *roadmap* foi composta pela alocação dos documentos separados com linhas e setas que se direcionam às subcamadas referentes às características daquela tecnologia, relacionando toda taxonomia no mapa, conforme exemplo na Figura 10.

Como apresentado na Figura 10, a tecnologia foi alocada no mapa por meio da logomarca (marca, universidade, instituto de pesquisa, algum fornecedor

importante no mercado atual), dos atores, ou *players*. A posição está de acordo com sua aplicação temporal (estágio atual, curto prazo, médio prazo e longo prazo).

Ressalta-se que o mesmo ator pode aparecer em diferentes espaços temporais de acordo com as diferentes tecnologias publicadas relacionando-se a diferentes taxonomias. As setas indicam a qual taxonomia a tecnologia está relacionada. Essas setas saem da logomarca indicativa até o ponto horizontal de interseção com a taxonomia ao qual se refere (Monteiro, 2022).

Figura 10 - Exemplo de alocação das tecnologias e a relação com a taxonomia



Fonte: Autora, 2023.

No mapa as linhas horizontais que saem de cada taxonomia foram representantes das mesmas. Como na presente dissertação foi feito um *roadmap* tecnológico, o ator foi alocado na camada “TECNOLOGIA” posicionado na linha horizontal corresponde ao mesmo.

Os exemplos da Figura 10 são lidos da seguinte maneira resumidamente:

- ATOR/*PLAYER* A: um arranjo tecnológico em que o ponto tecnológico principal é um filtro ou arranjo de filtros operados com processo físico e biológico aplicados a baixos volumes tratados.
- ATOR/*PLAYER* B: uma tecnologia ou equipamento de lodo ativado em que o processo é realizado por bio-sólido (ex. grânulos de lodo ativado) e processo físico com impacto ambiental reduzido e com aplicação para tratamento de altos volumes de esgoto.

No relatório conclusivo e discussão do *roadmap* os detalhes são apresentados, como em uma análise por camadas: mercado, processos e tecnologia. No Apêndice A, Apêndice B e Apêndice C encontram-se os documentos referencias (patentes e artigos) utilizados no *roadmap*. E no Apêndice D, encontram-se os logotipos/logomarcas utilizados referentes a cada um dos atores.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e aplicação do *technology roadmapping* assim como a arquitetura final do *roadmap*. Além disso, é feita a análise das tecnologias de forma a avaliar as tendências e selecionar alternativas para o tratamento de esgoto.

4.1. Etapa pré-prospectiva

4.1.1. Tecnologias e arranjos tecnológicos atuais

Grande parte das tecnologias e/ou arranjos tecnológicos em operação, atualmente, no tratamento secundário e terciário de esgoto sanitário são bem difundidas entre as empresas que atuam no setor e as universidades.

No Brasil, apesar da baixa cobertura de tratamento de esgoto, conforme apresentado na revisão bibliográfica desta dissertação, os sistemas herdados ainda apresentam defasagem em termos de atualização e modernização. Mas, apesar disso, espera-se que com o Novo Marco do Saneamento (Brasil, 2020) e as metas estabelecidas, as novas ETEs possam operar com sistemas mais atuais e avançados, além de contribuir positivamente com o meio ambiente.

O Atlas Esgotos elaborado pela ANA (2020) identificou os principais processos unitários utilizados nas ETEs no Brasil, sendo estes: fossas sépticas, tanques de aeração, lagoas de estabilização, reatores anaeróbios, lodos ativados e filtros (anaeróbios e aeróbios). Alguns arranjos observados contavam com processos de floculação seguidos de sedimentação/filtração ou flotação.

Os arranjos foram organizados em sete conjuntos para classificação das ETEs conforme a Tabela 7. Os maiores números nacionais correspondem, em ordem crescente, aos processos simplificados (12%), sistemas de lagoas (35%) e em maior porcentagem os reatores anaeróbios (37%). Os processos simplificados tratam de sistemas com pouca mecanização e com eficiência de tratamento bastante limitada. Muito utilizados para pequenos volumes, pode-se citar neste conjunto as fossas sépticas coletivas e fossas sépticas coletivas seguidas de filtro anaeróbio.

Tabela 7 – Conjuntos de classificação das ETEs no Brasil

Conjunto	Nº de ETEs	Porcentagem %
1. Situações Especiais	75	2%
2. Processos Simplificados	442	12%
3. Sistemas de Lagoas	1.291	35%
4. Reatores Anaeróbios	1.373	37%
5. Lodos Ativados	354	10%
6. Tratamento Químicos e Biológico	64	2%
7. Miscelânea de Processos	69	2%
Total	**3.668**	**100%**

Fonte: Dados extraídos do Atlas Esgotos - ANA, 2020.

Em seguida, 35% dos conjuntos correspondem aos sistemas de lagoas. Estes sistemas são muito variados e permitem diversas opções de arranjos ou de operação. São sistemas simples de pouca manutenção. No entanto, precisam de grandes áreas disponíveis e podem se tornar inconveniente quando próximo a núcleos urbanos, principalmente quando se tratam de lagoas anaeróbias. O sistema australiano de lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa é o mais utilizado (414 unidades).

O mais comum no país, de acordo com o Atlas Esgotos (ANA, 2020) é a utilização de reatores anaeróbios – 37%. Usado de forma isolada é o mais comum segundo o levantamento (419 unidades), conforme apresentado na Tabela 8. No

entanto, quando usados isoladamente, muitas vezes o produto obtido não atende aos padrões de qualidade exigidos pelos órgãos ambientais. Desta forma, os reatores são associados a outros processos para melhorar a remoção de DBO e reduzir partículas em suspensão.

Diversos processos podem, então, ser associados aos reatores anaeróbios, como: filtros anaeróbios ou aeróbios, lodos ativados e sistemas de lagoas. O mais comum entre os arranjos de processos é o que constitui a chamada ETE compacta: reator anaeróbio seguido de filtro aeróbio e decantador secundário final. Como produto, utilizar a ETE compacta (ETEs menores) obtêm-se grande diminuição da carga orgânica da água produzida.

Em termos de qualidade, os sistemas de lodos ativados podem produzir efluente tratado com alta remoção de carga orgânica, além de remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Podem atender volumes de grande população em uma área bem menor se comparado aos sistemas de lagoas. No entanto, são processos mais complexos e mecanizados, sendo necessário manutenção e operação especializada. Normalmente, os processos de lodos ativados utilizam operações automatizadas.

Visando apresentar o estágio atual de tratamento de esgoto sanitário no Brasil, a etapa pré-prospectiva da presente dissertação apresenta, na Tabela 8, os arranjos mais comuns em operação com foco na eficiência do tratamento.

Os sistemas de lagoas, quando associados em série, aumentam significativamente sua eficiência. Lagoas facultativas seguida de lagoa de maturação possuem uma eficiência de remoção de carga orgânica de 80%, mas quando modificado o arranjo para Lagoas Facultativas em Série + Lagoas de Maturação em Série, a eficiência aumenta para 90% (ANA, 2020).

Se realizado com aeração, como Lagoa Aerada + Lagoa Facultativa Aerada + Flotação, essa eficiência sobe para 95%. Sistemas com lagoas associados com outros processos podem atingir níveis altos de remoção de matéria orgânica, acima de 90%. No entanto, são necessários grandes áreas e volumes consideráveis para implantação do processo.

Tabela 8 – Arranjos tecnológicos usuais no Brasil para tratamento de esgoto sanitário

Arranjo Tecnológico	Nº Unidades	Remoção de Matéria orgânica
Fossa Séptica + Filtro Anaeróbio/Biológico	323	70%
Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa/Lagoa de Decantação (Sistema Australiano)	414	82%
Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação	169	80%
Reator Anaeróbio (RALF, UASB, DAFA)	419	68%
Reator Anaeróbio + Filtro Anaeróbio/Biológico	174	73%
Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio (FBAS/FBP/BAS/FAE/FBN/Filtro Russo)	124	80%
Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador	212	85%
Reator Anaeróbio + Lodos Ativados - Processo U-BOX (configuração compacta)	4	85%
Reator Anaeróbio + Filtro Biológico (TRICKLING FILTER SYSTEM)	7	80%
Lodos Ativados Convencional	104	88%
Lodos Ativados de Aeração Prolongada	69	90%
Lodos Ativados de Aeração Prolongada com Ultrafiltração	2	92%
Lodos Ativados NEREDA/UNITANK	8	90%
Lodos Ativados em Batelada - SBR *Sequencing Batch Reactor*/ICEAS Aeração Prolongada com Ciclos Intermitentes	105	90%
Lodos Ativados MBBR/IFAS (Reator de Biofilme Móvel/ Lodos Ativados com Biofilme Fixo Integrado)	12	90%
Reator Anaeróbio + Floculação Quimicamente Assistida + Flotação	19	90%

Fonte: Adaptado de ANA, 2020.

Conforme Tabela 7, o uso de reatores anaeróbios são os mais comuns atualmente no Brasil. Podem ser por unidades únicas ou seguidas de pós-tratamento. Um ponto que faz o processo ser simplificado em termos de

disposição é que ao utilizar o UASB, não há necessidade de um tanque de decantação primária.

Com a alimentação contínua do reator anaeróbio a biomassa presente precisa ser retirada regularmente para manter o equilíbrio do sistema. No entanto, a geração de lodo não é tão elevada e este já sai digerido e adensado, sendo necessário somente a desidratação (Von Sperling, 2014), o que é um ganho em termos de impacto ambiental.

A eficiência dos reatores anaeróbios por si só, conforme Tabela 8 está em torno de 68%, por isso normalmente o processo é associado a outras etapas, como seguidos por filtros aeróbios ou anaeróbios com etapas de decantação, se necessário. Ainda que o arranjo possua eficiência abaixo de 90%, uma vantagem é que o espaço físico das unidades de tratamento de esgoto é menor quando comparadas a opções sem o reator (Von Sperlin, 2014).

O chamado *TRICKLING FILTER SYSTEM* apresentado na Tabela 8 corresponde aos também conhecidos Filtros Biológico Percolador. São muito utilizados como pós-tratamento de sistemas anaeróbios. São sistemas de fácil operação e manutenção e também baixo custo e consumo energético. Os organismos se aderem ao leito (brita e anéis plásticos) nos quais os microorganismos formam um biofilme fixado ao material suporte (de até 3mm) o que propicia uma elevada concentração de biomassa no filtro.

O esgoto é distribuído no topo desses filtros por difusores rotativos. Normalmente, emprega-se um decantador após, pois no processo de reação aeróbia/anaeróbia com o tempo há desprendimento da carga microbiológica do filtro e é necessário realizar a separação entre sólido (biológico) e líquido (efluente tratado). Para polimento do efluente obtido para aplicação no reuso, pode-se empregar sistemas pós-tratamento de ultrafiltração com membranas poliméricas e desinfecção.

Ao pensar em associar elevada eficiência e baixos requisitos de áreas, o processo de lodos ativados são uma alternativa ideal no cenário atual. Mas em contrapartida apresentam a desvantagem de serem processos com necessidade elevada de mecanização e consumo energético. Uma alternativa em que os

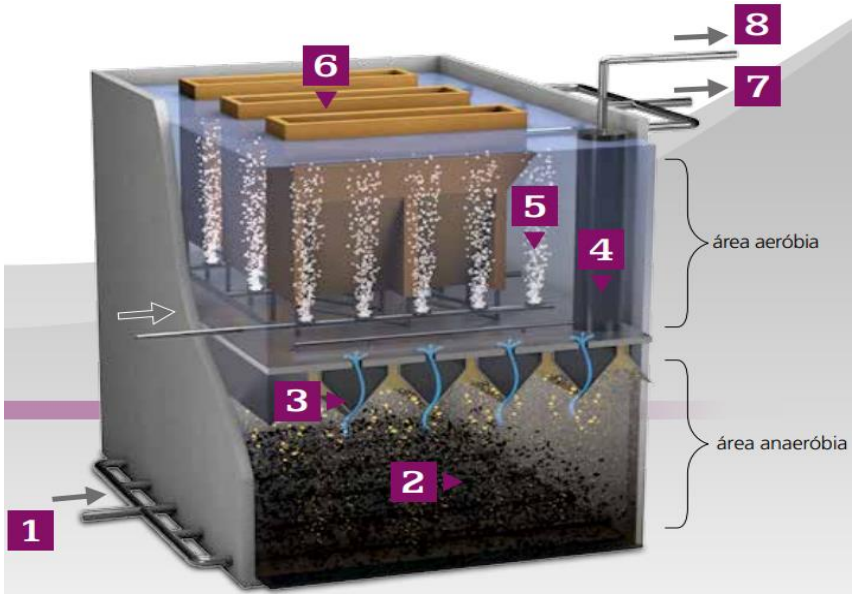
reatores são associados ao processo com lodo ativado é o U-BOX que se refere a uma configuração compacta.

Neste contexto, tem-se o BIOPAQ®UBOX concebido pela Paques[2]. A concepção é modular com capacidades para atender e 5 a 40mil habitantes. Para atender maiores capacidades basta associar os diferentes módulos. A ideia de aplicações U-BOX tem a vantagem de permitir expansões futuras considerando o crescimento habitacional da localidade com a implantação em etapas.

De modo geral, a eficiência de um U-BOX é cerca de 85%, mas pode atingir valores maiores. A Paques garante ao seu módulo uma eficiência acima de 90% na remoção de DBO. Nenhuma emissão de odor e reaproveitamento de energia pela produção de biogás. Logo, baixo consumo de energia. São adequados para áreas urbanas e ocupam pequenas áreas. Tem alta retenção de lodo biológico (baixa geração) e a limpeza é automática sem parada de operação (Paques, 2023). A

Figura *11* apresenta um exemplo do módulo concebido pela empresa.

Figura 11 – Esquema do BIOPAQ®UBOX concebido pela Paques



[2] PAQUES: possui sede na Holanda, líder mundial em tratamento anaeróbio, águas residuais e biogás. Possui subsidiárias no Brasil, Chile, Estados Unidos, Índia, Malásia e Tailândia. Informações em <www.paques.com.br>

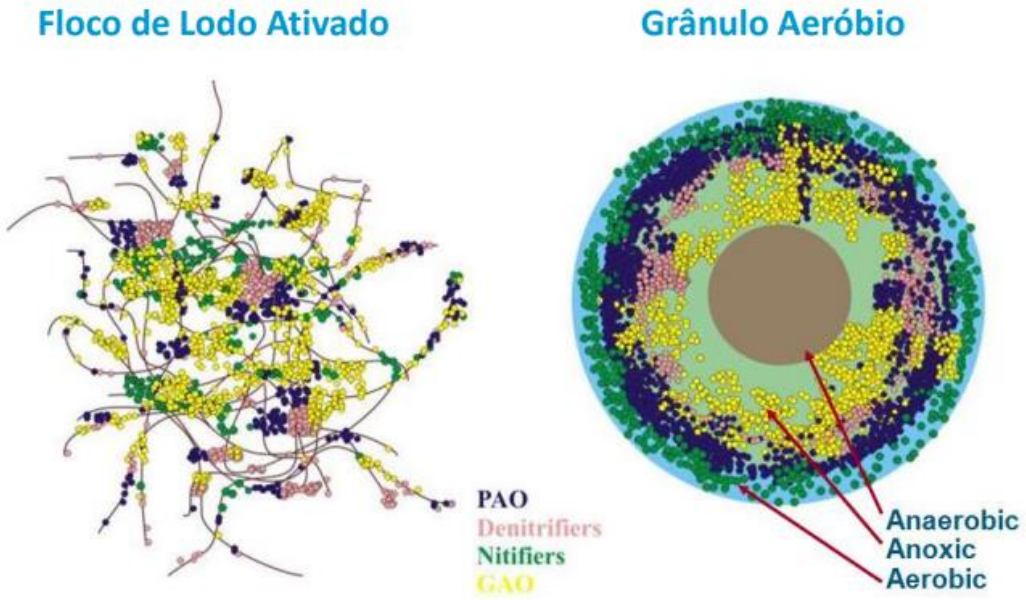
Fonte: BIOPAQ®UBOX, Paques, 2023.

O esgoto é alimentado no ponto (1) em uma distribuição uniforme e agitado na etapa de digestão anaeróbia. Na etapa anaeróbia (2) o componente orgânico é convertido em biogás e coletado no separador trifásico. O efluente flui para etapa aeróbia através de passagem anti-retorno (3). O biogás é coletado (4) para o lavador de gases onde ocorre dessulfurização sem adição de químicos.

Os difusores de ar (5) para oxidar a carga orgânica remanescente da etapa aeróbia assim como compostos que conferem odor. O efluente é clarificado no decantador com retenção de biomassa pela área de contato. Na saída (7) tem-se o efluente tratado e na saída (8) o biogás sem H_2S.

A tecnologia Nereda® trata-se de estrutura de grânulos aeróbios com os mesmos microorganismos do lodo ativado com mais biomassa, porém sem necessidade de meio suporte conforme apresentado na comparação da Figura 12.

Figura 12 – Comparação entre o floco de lodo ativado e o grânulo aeróbio da tecnologia Nereda®



Fonte: BRK Ambiental, 2018.

A concepção e início da tecnologia Nereda® foi na Delft University of Technology, em 1993, sendo a tecnologia lançada oficialmente em 2005. Em 2008, foram realizados testes em Portugal e o *start-up* da primeira planta em larga escala foi na Holanda em 2011. Em 2013, o sistema foi licenciado no Brasil (BRK Ambiental, 2018).

O processo consiste no ciclo de enchimento/descarte, seguido de aeração e reação. Após a reação aguarda-se o processo de sedimentação. A tecnologia é aplicada, como observado na descrição anterior, em reatores em batelada. Segundo a BRK Ambiental (2018), a remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo pode ser comparado as tecnologias de membranas. O material microbiológico é estável e bastante resistente às variações do efluente. Também possibilita a automação total da planta e instalação em plantas já existentes.

No Brasil, o processo opera na ETE Deodoro, no Rio de Janeiro (750-1000L/s) e na ETE Jardim Novo em Rio Claro-SP (272L/s). No estudo de caso da ETE Jardim Novo em Rio Claro-SP a tecnologia Nereda® substituiu 6 UASB + 3 Tanques Anóxico + 3 Lodos Ativados por 3 reatores Nereda®, resultando em 51% de redução em volume de processo (m^3) e 34% de redução em potência (kW) (BRK Ambiental, 2018).

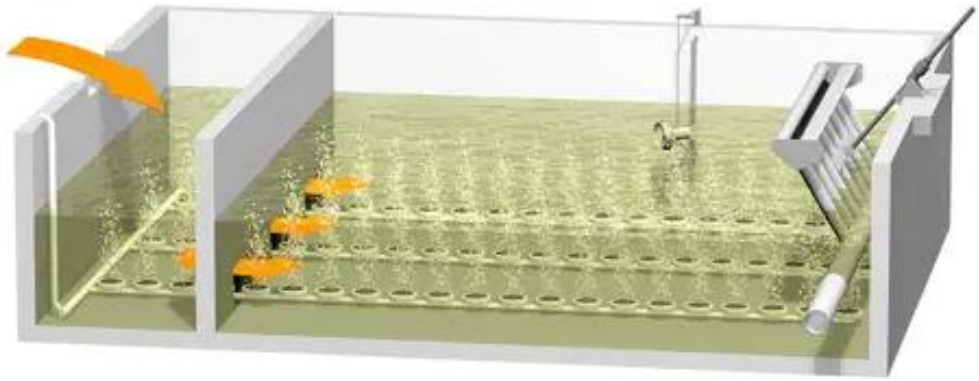
O SBR (*Sequencing Batch Reactor*) ou Reator Sequencial em Batelada é um processo em que unifica as etapas geralmente associadas a lodo ativado em um tanque único com processo em batelada. Os ciclos são compostos por: enchimento, reação, sedimentação, esvaziamento e repouso. A duração das etapas depende da qualidade do esgoto bruto e da biomassa no sistema (VON SPERLING, 2014). Existem diversas empresas que fabricam modelos de SBR para diferentes volumes (variando de 5m^3/dia a 1000m^3/dia como por exemplo a BIDATEK[3]).

[3] BIDATEK WATER SOLUTION: fornece opções de tratamento biológico (SBR, MBR, MBBR...) e tratamento terciário para reutilização de água (desinfecção com cloro, UV, ozônio etc.). Informações em <www.bidatek.com>

Uma alternativa avançada é o Sanitaire ICEAS^{TM} Advanced SBR da Xylem[4]. Este é um processo biológico de fluxo contínuo com múltiplas vantagens quando comparado ao lodo ativado convencional e SBR. Projetado para tratar vazões de 100 m³/dia a 300.000 m³/dia (Xylem Water Solutions, 2024). O esquema é mostrado na Figura 13.

Em comparação ao SBR, oferece operação simplificada por ser de fluxo contínuo e minimiza o uso de energia em 50%. Além disso, a distribuição do fluxo no tanque economiza 30% em termos de área total. Ou seja, reduz as despesas de investimento (capital inicial) com necessidades de menor terreno e redução dos custos de construção civil. A tecnologia possui um otimizador de desempenho de processo em que adequa a quantidade de energia às necessidades dinâmicas do processo. Além disso, controla idade do lodo e pode ser projetado para remoções de nitrogênio e fósforo (Xylem Water Solutions, 2024).

Figura 13 – Esquema do Sanitaire ICEAS^{TM} Advanced SBR da Xylem



Fonte: Xylem Water Solutions, 2024.

Outra linha variante do processo de lodos ativados é o MBBR (*moving bed biofilm reactor*) ou IFAS (*Integrated Fixed Film Activated Sludge*). A ideal é a inserção de um meio suporte para que a biomassa cresça aderida ao biofilme. O

[4] Xylem: uma das líderes globais em tecnologias de água, presente em 150 países com sede em Nova Iorque – USA. Nomeada em 2012 para o Índice Mundial de Sustentabilidade. Informações em <www.xyleminc.com>

processo de aderência e reação na superfície é similar ao descrito para o *TRICKLING FILTER SYSTEM*.

A tecnologia opera por meio da inserção de pequenas peças plásticas de baixa densidade e grande área superficial no interior do tanque de aeração atuando como meio suporte para a formação do biofilme e crescimento da biomassa (MBBR Brasil[5], 2024). A maior concentração de sólidos aderida e mantida em suspensão no reator permite o aumento da decomposição da matéria orgânica e da conversão de compostos nitrogenados.

A empresa Kaldnes Miljøteknologi[6] (Tønsberg, Noruega) juntamente a *Foundation for Scientific and Industrial Research* (SINTEF) (Trondheim, Noruega), desenvolveram o MBBR (Amaral, 2021). O MBBR vem sendo utilizado em todo o mundo devido a eficiência do seu processo, atingindo padrões de potabilidade no tratamento de água bruta (Rusten *et al.*, 2006) e tendo seu conceito amplamente empregado em sistemas integrados de biomassa fixa, também conhecido como IFAS.

A principal diferença entre o MBBR e o IFAS está no fato de que no sistema IFAS a recirculação de lodo está presente. São sistemas que requerem pouco espaço disponível e podem tratar grandes volumes de esgoto. Tem alta resistência a choques de carga orgânica, reduz cerca de 40% em obras civis nas ETEs. Os suportes apresentam boa resistência ao calor, estabilidade química, longa vida útil. Apresenta baixo custo operacional e de energia. Podem acrescentar processos de nitrificação e desnitrificação ao processo (MBBR Brasil, 2024).

[5] MBBR BRASIL: é uma empresa especializada no fornecimento de Biomídias para o processo MBBR (*Moving Bed Bioreactor),* IFAS (*Integrated Fixed Film Activated Sludge*), FBP (Filtro Biológico Percolador) e FAS (Filtro Aeróbico Submerso). Informações em <www.mbbrBrasil.com>

[6] Em 2002 a Anox AB comprou 100% da Kaldnes Miljøteknologi, tornando-se AnoxKaldnes. Em 2007 o grupo Veolia adquiriu a AnoxKaldnes e em 2008 a companhia mudou o nome para Krüger Kaldnes AS. Informações em < https://www.krugerkaldnes.no/no/about-kruger-kaldnes-no>

4.2. Etapa Prospectiva

Conforme já apresentado, no horizonte temporal a curto prazo estão as patentes já concedidas. Os parâmetros listados foram utilizados na primeira pesquisa das patentes em geral, e posteriormente separadas entres patentes concedidas e patentes solicitadas:

Pesquisa I:

- Database: INPI – Espacenet
- Palavra-chave: (WASTEWATER OR SEWAGE) AND URBAN AND TREATMENT AND TECHNOLOGY AND (RECYCL* OR REUSE)
- Campo de busca: título ou resumo
- Documentos encontrados: 81

Pesquisa II:

- Database: WIPO Patentscope
- Palavra-chave: FP:((WASTEWATER OR SEWAGE) AND URBAN AND TREATMENT AND TECHNOLOGY AND WATER (RECYCL* OR REUSE))
- Campo de busca: Todos os campos
- Documentos encontrados: 202

Dos 81 documentos encontrados no INPI – ESPACENET, 61 encontravam-se dentro do período de interesse (2013-2023). Dentre os documentos relevantes, foi feito uma análise e excluídas as patentes que estavam fora do foco determinado pela dissertação. No entanto, a leitura dos resumos das 61 patentes separadas permitiu notar que existe um foco e direcionamento considerável a respeito do reaproveitamento do lodo gerado em ETE.

Dentre os 202 documentos encontrados no Patentscope, 9 estavam fora do período de busca e 58 estavam em duplicidade com a busca realizada na ESPACENET, resultando em 133 documentos. Dentre estes foi realizada uma análise individual com remoção das patentes que estavam fora do escopo da dissertação. Por fim, agrupados os resultados das duas bases, foram separados 58 documentos que estavam dentro do escopo da pesquisa, sendo: 15 patentes concedidas e 43 patentes solicitadas.

4.2.1. Prospecção a curto prazo: patentes concedidas

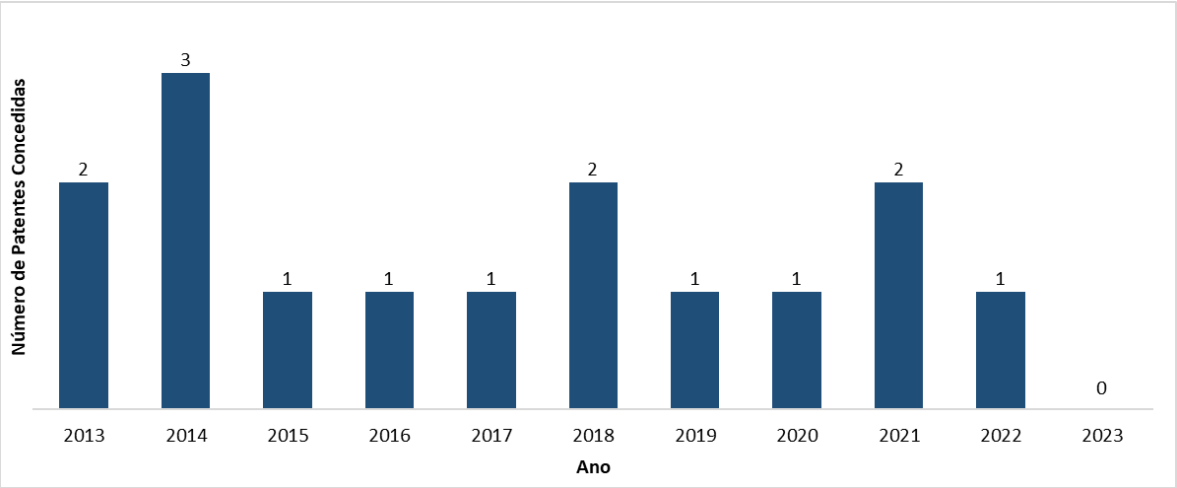
No horizonte temporal a curto prazo estão as patentes já concedidas. Deste modo, foram separados 15 documentos (Apêndice A) que estavam dentro do escopo da pesquisa.

4.2.1.1. Análise Macro

A série histórica com as datas de publicação das patentes selecionadas, como mostra a Figura 14, apresenta o ano de 2014 com o maior volume de patentes concedida, com um total de 3 patentes publicadas. Importante ressaltar que todas as patentes concedidas selecionadas por meio das duas bases de pesquisa foram patentes publicadas na China.

De fato, nas buscas realizadas antes mesmo do filtro aplicados e seleção das patentes, a China aparecia com o maior número de publicações em todos eles.

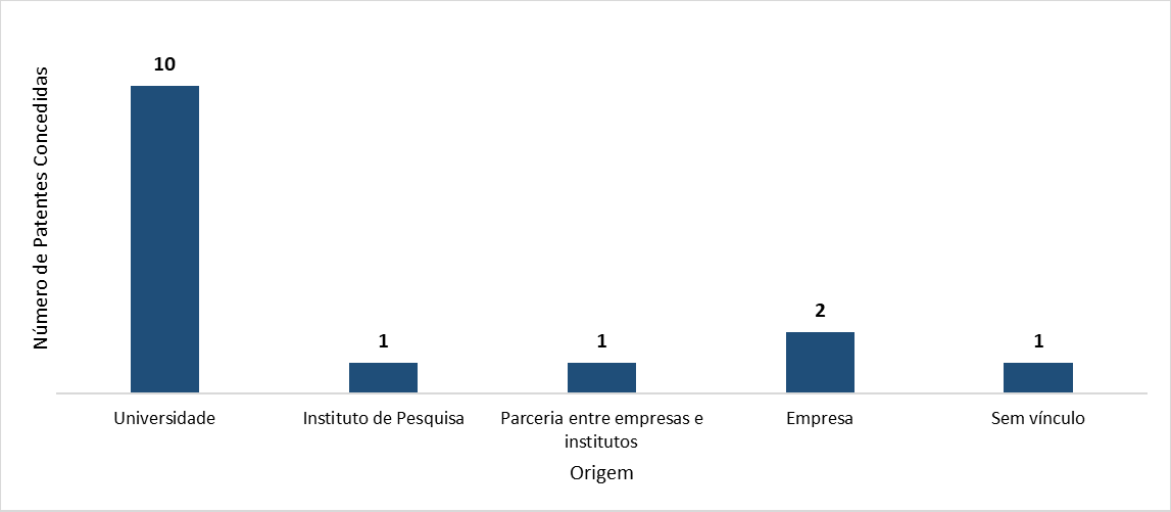
Figura 14 – Série histórica de patentes concedidas



Fonte: Autora, 2024.

As instituições que detém das patentes foram classificadas de acordo com a Figura 15, divididas entre: Universidade (10), Instituto de Pesquisa (1), Parceria (1), Empresas (2) e sem vínculo (1). Os dados mostram que na totalidade, o domínio das pesquisas acerca de tecnologias para tratamento de efluente com produção de água de reuso são interesse, de maior parte, das universidades, seguido das empresas.

Figura 15 – Patentes concedidas por instituição de origem



Fonte: Autora, 2024.

4.2.1.2. Análise Meso

A etapa posterior a análise macro é enquadrar as patentes nas subcamadas do *roadmap*. Cada uma das 15 patentes concedidas selecionadas foi analisada. Observou-se que os temas, objetivos e resultados das patentes concedidas abrangem por completo as subcamadas definidas na taxonomia, conforme Tabela 9. Desta forma, as 15 patentes selecionadas enquadram o tipo de processo e tecnologia utilizada para obtenção de água de reuso. Além de apresentarem direcionadores e tendências, como aplicabilidade, eficiência, impacto ambiental e etc.

Tabela 9 – Quantidade de patentes concedidas por subcamada do *roadmap*

Subcamada	Número de Patentes Concedidas
Tendências e Direcionadores	15
Processo de Tratamento	15
Tecnologia de Tratamento	15

Fonte: Autora, 2024.

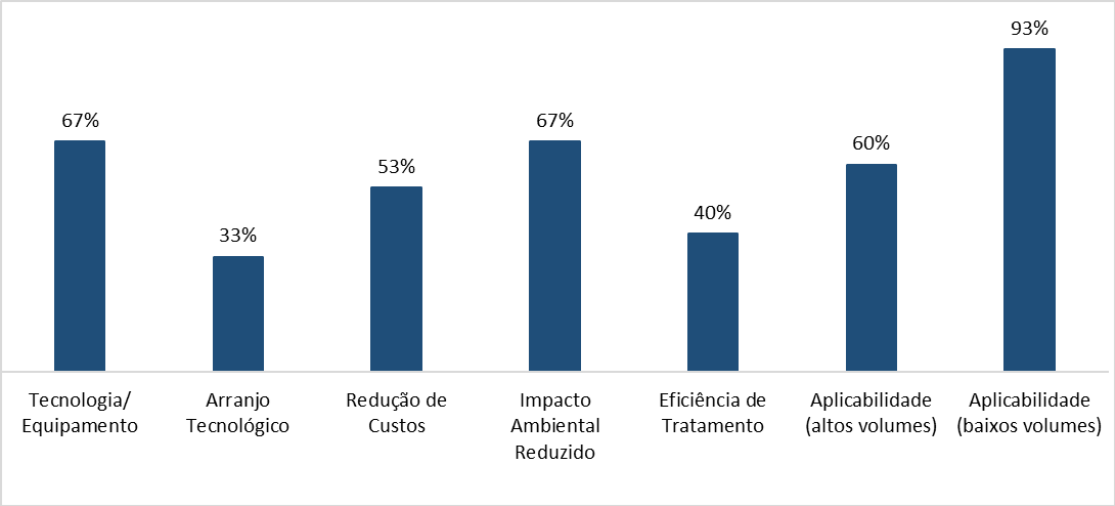
4.2.1.3. Análise Micro

Nesta etapa, cada uma das subcamadas apresentadas foi destrinchada de forma que os documentos sinalizem as características atribuídas. Iniciado com “tendências e direcionadores”, as 15 patentes foram classificadas conforme Figura 16. A maior parte das patentes selecionadas referem-se a um equipamento novo ou tecnologia nova (67%), enquanto as demais referem-se a um conjunto de operações ou arranjos existentes que melhoram a qualidade do esgoto tratado (33%).

Das tecnologias/equipamentos apresentados, foram citadas membranas (em filtro ou biorreatores), novas formulações ou enriquecimento bioquímico de bio-sólidos (biofilmes e lodo ativado), processos de adsorção para remoção de metais e aplicações e campos eletromagnéticos.

Para arranjos tecnológico, os sistemas convencionais de coagulação, sedimentação e/ou filtração e oxidação foram mais evidentes. Apesar de serem tecnologias mais antigas, ainda foi encontrado um arranjo considerando lagoas de estabilização e suas variações, levando-se em conta que a aplicabilidade nestes casos são pra altos volumes de esgoto tratados.

Figura 16 – Porcentagem de patentes concedidas por classe de "Tendências e direcionadores"



Fonte: Autora, 2024.

Interessante ressaltar que as patentes apresentaram redução de custos e impacto ambiental reduzido como fatores que caminham juntos. Entende-se que a redução dos impactos ambientais está diretamente relacionada com os custos associados, e neste caso destaca-se redução na geração de resíduos e eficiência energética como fatores importantes para ambos.

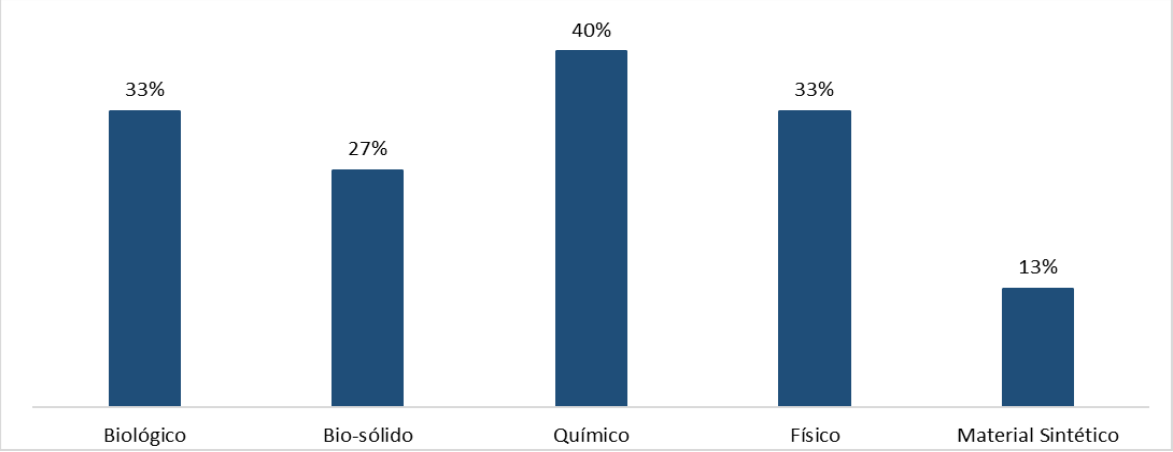
Apesar da pesquisa de patentes buscar tecnologias que produzam água para reuso, ou seja, com qualidade elevada para tal, poucas patentes destacaram

quantitativamente a eficiência no tratamento ou pelo menos uma comparação com os tratamentos convencionais hoje praticados. Assim, das patentes selecionadas, 40% deixaram evidentes o quão eficiente é a tecnologia aplicada. No entanto, todas destacaram que a tecnologia ou arranjo produzem água para reuso não potável. Algumas ainda destacaram a aplicação desta água produzida na agricultura ou áreas verdes.

A maioria das patentes apresentaram aplicabilidade para pequenos volumes produzidos (93%). Processos com membranas e biofilmes se destacam neste tópico. Dos 60% sinalizados com aplicabilidade a altos volumes produzidos, todas também estão alocadas em baixos volumes. Ou seja, as tecnologias ou arranjos propostos nas patentes aplicam-se para baixos volumes ou possuem aplicabilidade ampla – podem ser utilizadas para produção de altos e baixos volumes de esgoto tratado.

Na taxonomia de aplicação de “processo e tratamento”, os aspectos utilizados para classificação correspondem ao tipo de processo ou insumo utilizado no tratamento do esgoto. Destacam-se, conforme a Figura 17, processos químicos (6 patentes) seguido dos processos biológicos e físicos (5 patentes cada).

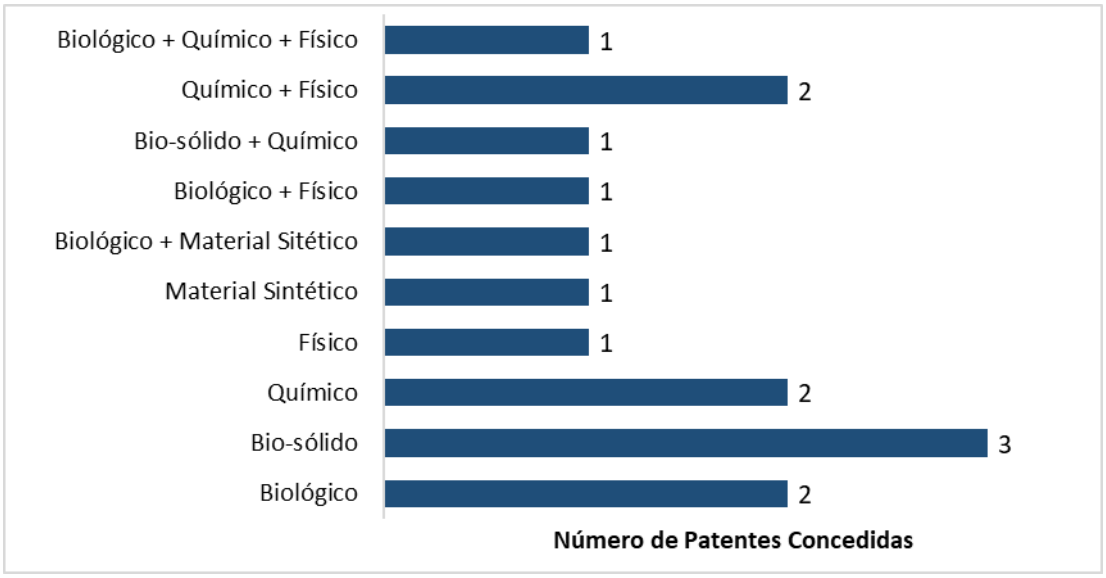
Figura 17 – Porcentagem de patentes concedidas por classe de "Processo de tratamento"



Fonte: Autora, 2024.

Os processos físicos aparecem com grande incidência devido aos processos de separação sólido-líquido imprescindíveis no tratamento de efluentes domésticos. Em sua maioria, os processos classificados em “físicos” também estão associados a outro tipo de processo. Das 5 patentes com processos físicos, 4 estavam associados a outros processos, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Processos e associações entre processos de tratamento



Fonte: Autora, 2024.

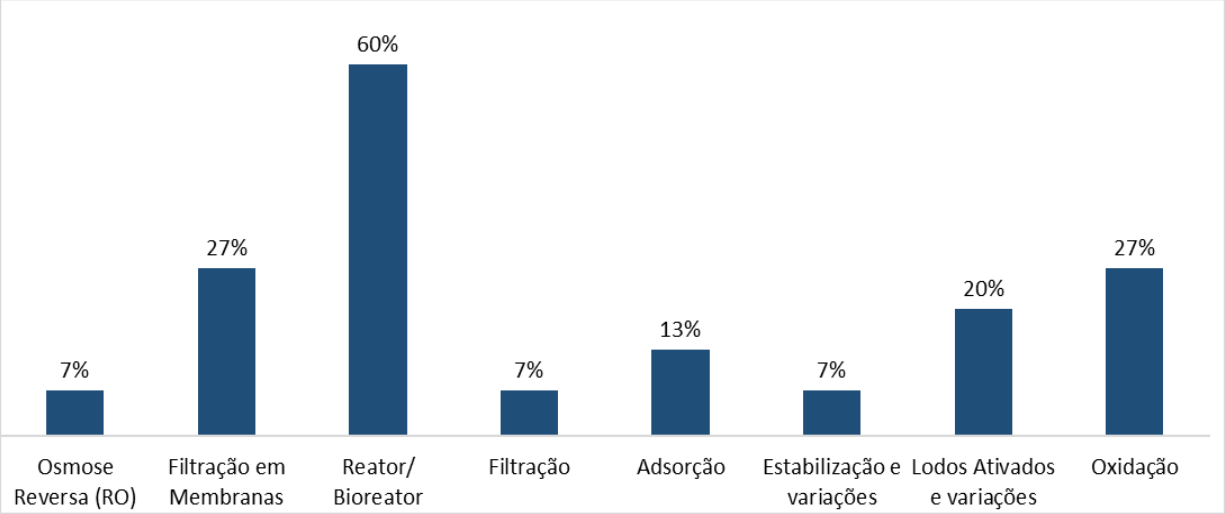
Em termos de processo químico, enquadrou-se 6 patentes selecionadas. Destas, 3 estavam associadas a outros processos. Uma patente desenvolveu um agente floculante de poliamida modificada, quitosana hiper ramificada e cloreto polimérico. É estável, não tóxico e não causa poluição secundária.

Outra tecnologia para tratamento avançado utilizando resina magnética apresentou bons resultados para obtenção de efluente para reuso paisagístico. Em associação com processos biológicos, tem-se a separação por precipitação e tratamento hidrotérmico do lodo para recirculação e posterior filtração do efluente em um processo por membrana biológica.

Para bio-sólidos, processos de enriquecimento de lodo ou produção de aditivos através do lodo para melhorar a eficiência de lodos ativados e biofilmes em reatores e processos com membranas. Utilização de carvão ativado e polissacarídeos para enriquecimento do lodo também são citados.

Em termos da taxonomia de “tecnologia de tratamento”, conforme Figura 19, os biorreatores com biofilmes, membranas e tanques reatores (aeróbios ou anaeróbios) se destacam, compondo 60% das patentes, seguido de filtração por membranas e oxidação.

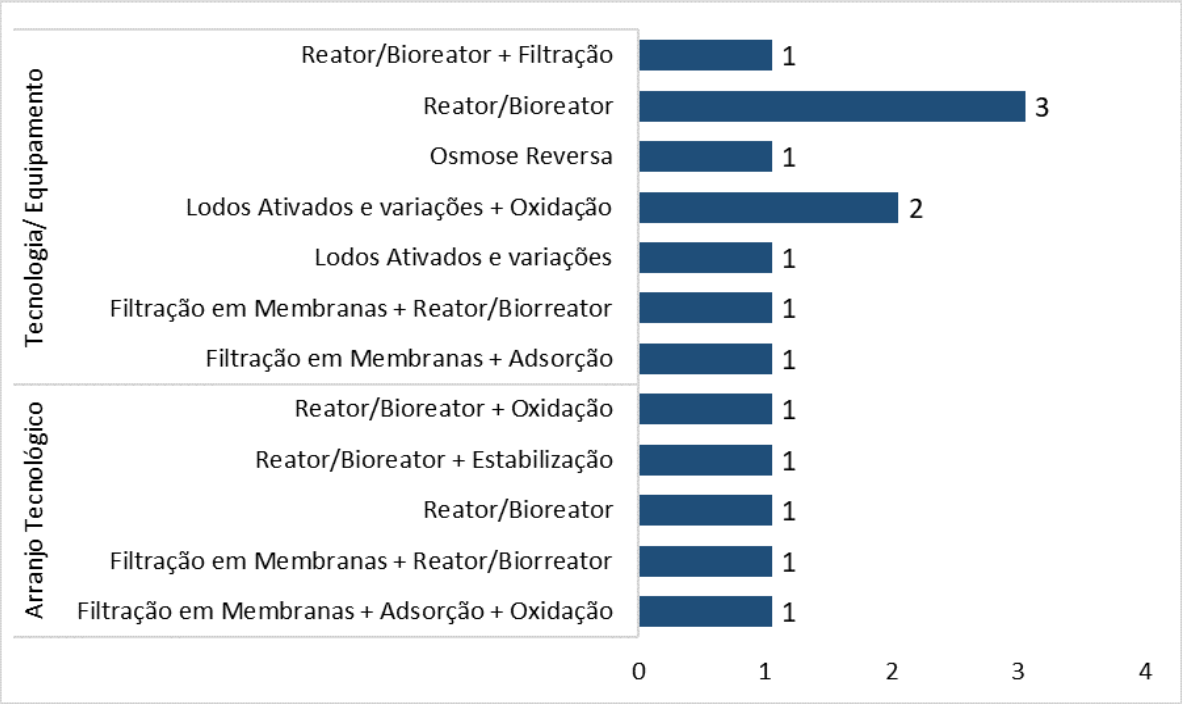
Figura 19 – Porcentagem de patentes concedidas por classe de "Tecnologia de tratamento"



Fonte: Autora, 2024.

Todos os processos de filtração em membranas e oxidativos apareceram associados a outros. Das 9 patentes com reatores/biorreatores, 5 delas estavam associadas a outras tecnologias. A frequência das tecnologias separadas e associadas está apresentada na Figura 20. A filtração foi abordada por diversas patentes. “Filtração” e “Filtração por membranas” somam 5 patentes, próximo aos reatores/biorreatores (9). Do ponto de vista da análise realizada, o processo de filtração é quase que imprescindível no tratamento de esgoto.

Figura 20 – Tecnologias, associações de técnicas compondo tecnologias e arranjos apresentados nas patentes concedidas



Fonte: Autora, 2024.

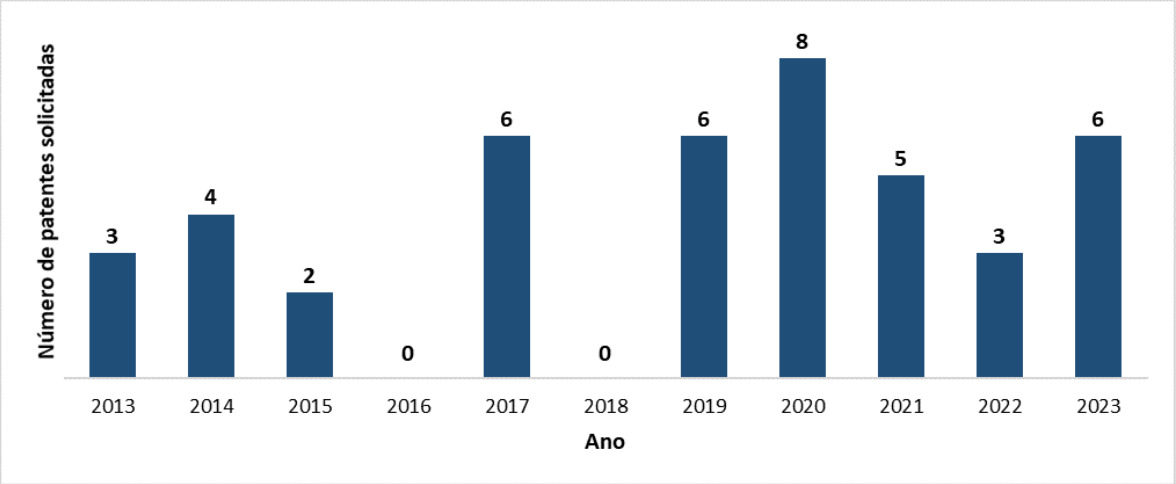
4.2.2. Prospecção a médio prazo: pedidos de patentes

A partir dos documentos encontrados, 43 (Apêndice B) correspondem às patentes solicitadas dentro do período de interesse da dissertação (2013-2023). Destaca-se que todas as patentes selecionadas aqui foram de publicações chinesas, conforme já sinalizado para patentes concedidas. Isso tem mostrado o país como destaque nas contribuições de patentes e artigos sobre técnicas para tratamento de efluente e consequentemente, para atingir padrões de reuso.

4.2.2.1. Análise Macro

Da série histórica das patentes solicitadas, destaca-se o ano de 2020 com o maior número de publicações solicitadas. Seguido dos anos de 2017, 2019 e 2023, com 6 patentes solicitadas em cada, conforme Figura 21.

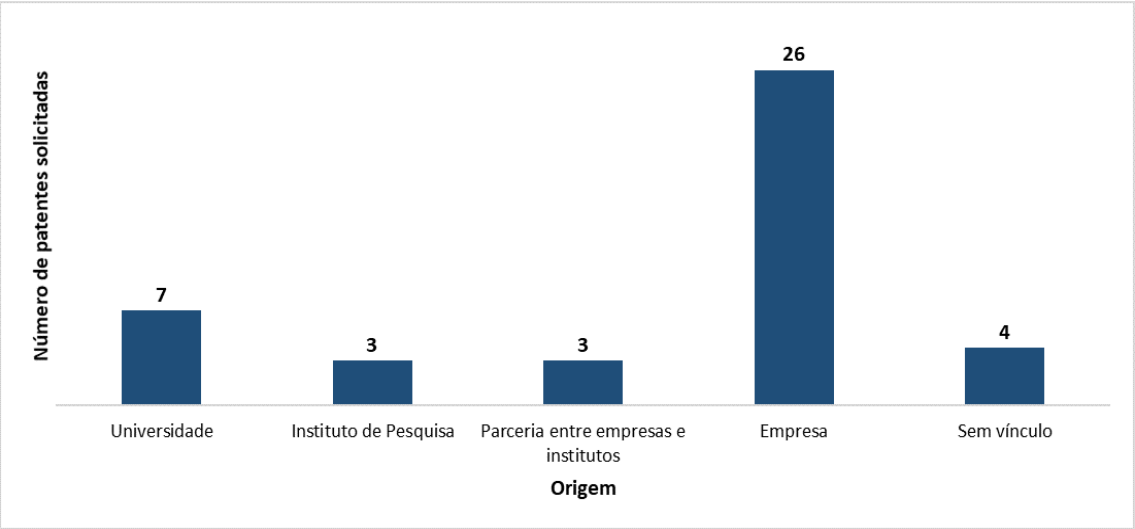
Figura 21 – Série histórica de patentes solicitadas



Fonte: Autora, 2024.

Entre as instituições que detém as solicitações de patentes, 26 correspondem a empresas, conforme apresentado na Figura 22, diferente do que ocorreu para as patentes já concedidas. Esse resultado evidencia um maior interesse das empresas em tecnologias em produzir água com qualidade suficiente para reutilização, além da melhoria da gestão dos recursos, com menores emissões de resíduos e diminuição dos custos associados. Em segunda posição, destacam-se as universidades. Por fim, o tema é de menor interesse entre institutos ou requerentes sem vínculo.

Figura 22 – Patentes solicitadas por instituição de origem



Fonte: Autora, 2024.

4.2.2.2. Análise Meso

Em seguida, após analisadas a nível macro, as patentes solicitadas foram classificadas de acordo com a taxonomia, conforme feito para as patentes concedidas. A análise das tendências foi realizada alocando as patentes nas subcamadas. Conforme resultado na

Tabela 10, todas 43 patentes selecionadas abrangem as subcamadas do *roadmap* em questão.

Tabela 10 – Quantidade de patentes solicitadas por subcamada do *roadmap*

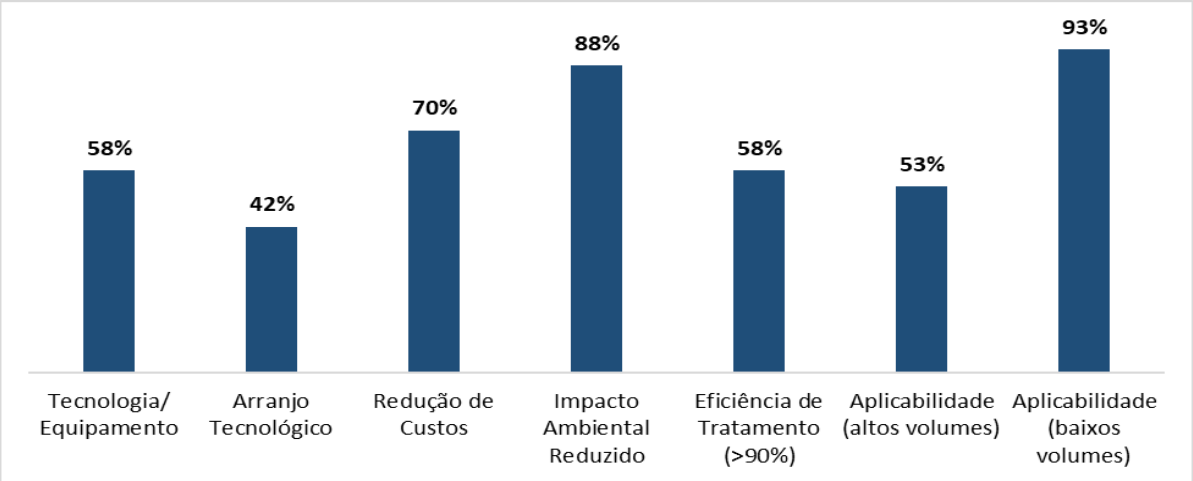
Subcamada	Número de Patentes Solicitadas
Tendências e Direcionadores	43
Processo de Tratamento	43
Tecnologia de Tratamento	43

Fonte: Autora, 2024.

4.2.2.3. Análise Micro

O primeiro tema abordado na análise das patentes solicitadas foram as tendências e direcionadores. A maioria das patentes solicitadas, 25 no total, tratava-se de uma tecnologia ou um equipamento com interesse em alcançar tratamentos avançados de efluentes – Figura 23. As demais 18 patentes solicitadas abordaram novos arranjos tecnológicos.

Figura 23 - Porcentagem de patentes solicitadas por classe de "Tendências e direcionadores"



Fonte: Autora, 2024.

Um dos maiores interesses entre os cessionários é a redução do impacto ambiental. Processos que garantem recirculação de lodo, reaproveitamento energético ou até mesmo níveis de emissões zero se destacam nesse ponto. Sem dúvidas, processos assim permitem considerável redução nos custos finais.

Processos que trazem vantagens ambientais tem grande valor no mercado atual e devido o foco ambiental, políticas ESG (*Environmental, Social and Governance*), selo verde e demais parâmetros voltados a economia circular, é justificável o resultado encontrado e apresentado. Para as empresas, deter

processos voltados a conservação do meio ambiente é de suma importância. Politicamente e também midiaticamente, resultados que contrapõe isso podem prejudicar a imagem da empresa. Desta forma, é possível associar o maior número de empresas interessadas no tema sinalizando de forma direta em suas solicitações de patentes à redução dos impactos ambientais, promovido pela tecnologia apresentada.

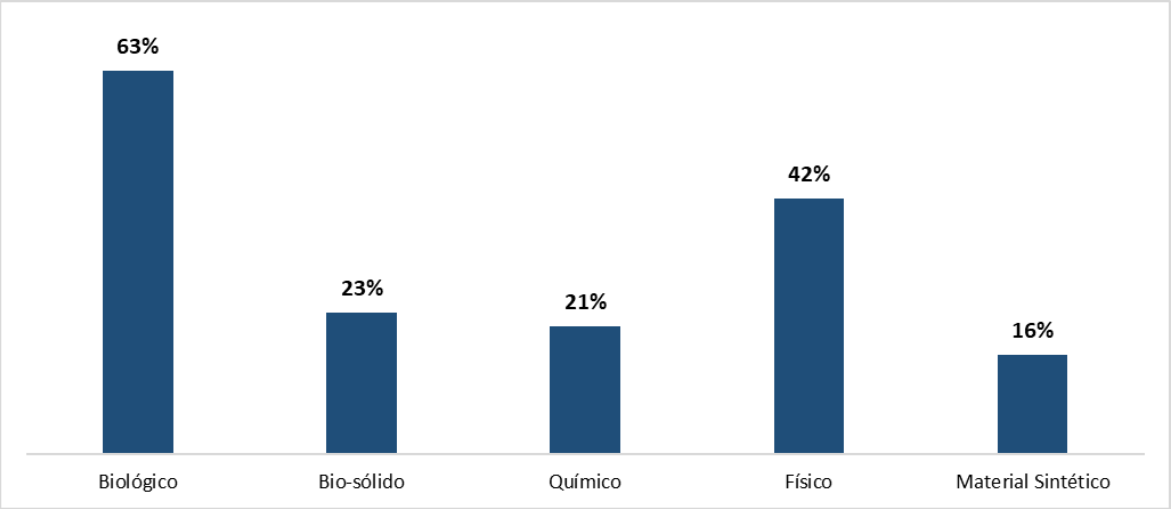
Apesar de o foco ser a eficiência de tratamento a nível de reaproveitamento do efluente tratado, 58% das patentes deixaram evidentes esses números. As demais sinalizam que o processo garante qualidade suficiente para reuso ou produzem água recicladas dentro dos padrões estipulados no país para tal.

Em relação a escala, conforme as demais análises, para capacidade de tratamento há um número considerável para processos em menor escala. No entanto, assim como patentes concedidas e artigos, a maior parte dos processos enquadrados em maiores volumes também pode ser alocado em pequenos volumes. Isso acontece, pois, esses processos têm aplicabilidade ampla. Além disso, processos que necessariamente precisam ser em menores escalas são sinalizados de forma direta.

A segunda subcamada do *roadmap* é a de “Processos de tratamento” e de fato. Conforme ilustrada Figura 24, os processos biológicos continuam predominante. A utilização de microorganismos ou agentes microbiológicos como insumos para o tratamento do esgoto permanecem como o método tradicional. Entre as 43 patentes solicitadas selecionadas, 25 envolvem processos biológicos, seja como método principal ou associado a outros processos.

Os processos de bio-sólidos, geralmente, estão associados a tecnologias de lodo ativado ou enriquecimento do mesmo com ferro ou carvão ativado. Os processos físicos sinalizados correspondem a separação sólido-líquido, como sedimentação ou filtração. A filtração é um processo de suma importância no tratamento de água e de efluentes. Os filtros são como uma barreira para remoção de microorganismos da água e efluente, garantindo segurança em termos de qualidade, principalmente microbiológica.

Figura 24 – Porcentagem de patentes solicitadas por classe de "Processo de tratamento"



Fonte: Autora, 2024.

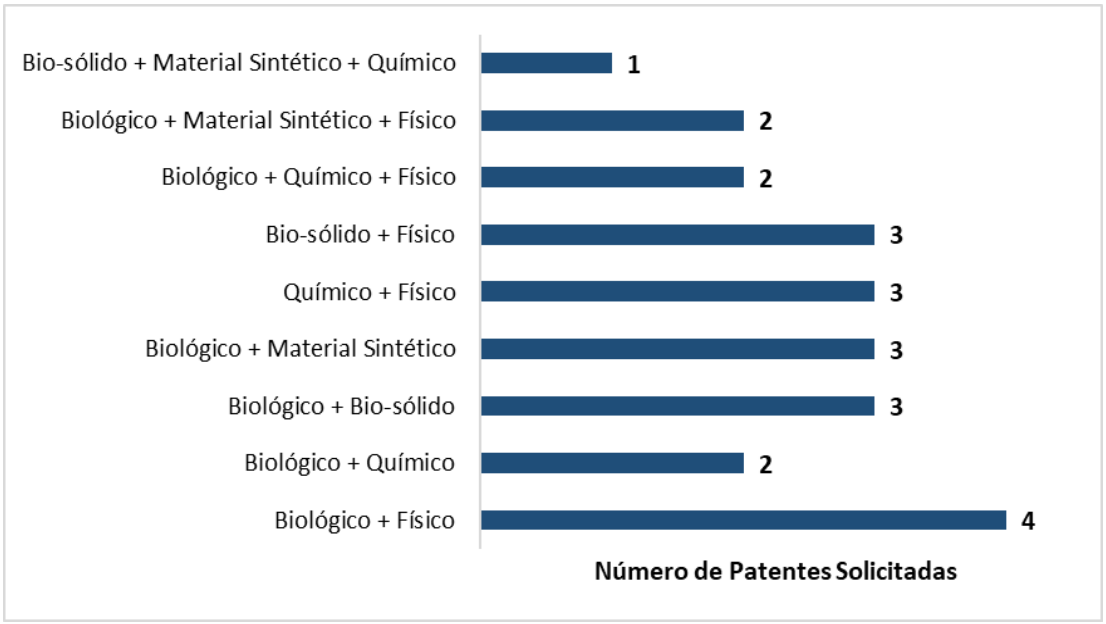
Geralmente, os processos químicos são caracterizados por aplicação de agentes coagulantes ou tratamentos físico-químicos, estando estes, então, associados. Tecnologias para processos oxidativos podem ser sinalizados neste item. Dentre esses processos químicos, o estudo de novas formulações de coagulantes é um campo de destaque. E para materiais sintéticos pode-se destacar catalisadores.

Duas patentes aplicaram compostos de Fe(III)/Fe(II) baseado em pirita e filtro de pirita e, um processo de coagulação utilizando composto químico (pó compósito) associado a processos com biorretores e outro com biorreator de membrana. Somente uma (1) patente citou unicamente o uso específico de materiais sintéticos: um compósito feito a partir de resíduos plásticos.

Levar em consideração a aplicação simultânea desses processos ou os mesmos aplicados em sequência também é importante. Das patentes selecionadas, 23 delas apresentavam de forma bem definida os processos imprescindíveis na operação da técnica. Dessas 25 patentes que envolvem processos biológicos 13 referem-se a tecnologia ou equipamentos específicos e 20 a arranjos tecnológicos.

A Figura 25 apresenta as associações entre os processos avaliados neste *roadmap*. Conforme já discutido, processos biológicos e físicos (principalmente a filtração) são os mais recorrentes e isso não foi diferente para associação deles.

Figura 25 – Associação entre processos nas patentes solicitadas



Fonte: Autora, 2024.

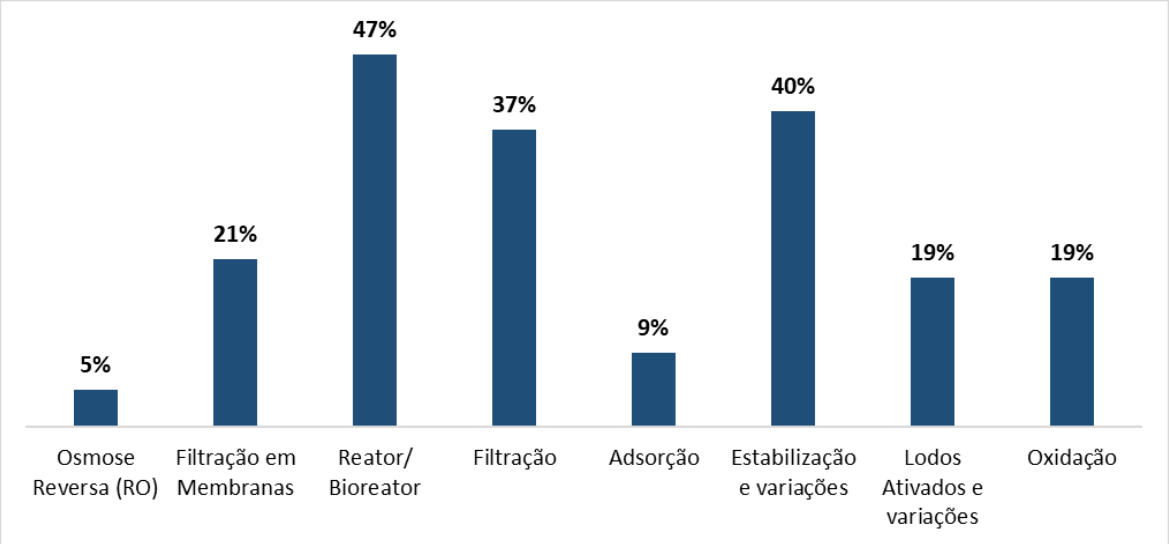
Das 23 patentes, 4 utilizam processos biológicos e físicos em associação e todas tratavam-se de um arranjo tecnológico. Em contrapartida, das outras 4 patentes que apresentaram processos biológicos + físicos associado a um terceiro, todas referem-se de uma tecnologia/equipamento.

Reatores/biorreatores, estabilização e filtração são destaques quando analisado a taxonomia da subcamada “Tecnologia de tratamento”. As reações microbiológicas e estabilizações biológicas ainda são bastante frequentes a médio prazo. Devido à preocupação ambiental atrelada ao paisagismo dos ambientes, as *wetlands* têm grande recorrência.

Foi possível encontrar diversas informações, por exemplo, de *wetlands* de pequenos volumes para prédios e condomínios, tanto verticais quanto horizontais. Para estes casos, além de produzir água que pode ser utilizada para limpezas

das áreas e descargas de banheiros, as áreas plantadas contribuem para atribuir áreas sustentáveis aos ambientes comuns.

Figura 26 – Porcentagem de patentes solicitadas por classe de "Tecnologia de tratamento"



Fonte: Autora, 2024.

Não houve considerável recorrência de solicitação de patentes a respeito de um método ou modelo de filtro específico. No entanto, os filtros aparecem como complementares às tecnologias ou arranjos apresentados. Geralmente, para “polimento” final do efluente depois de passar por processos específicos. Somente uma patente apresentou o filtro como tecnologia específica: aplicação de filtro de pirita. O objetivo é uma filtração associada a um processo oxidativo neste filtro.

Com maior frequência, encontram-se os reatores/biorreatores. Das 20 solicitações de patentes que apresentam reatores ou biorreatores, 7 eram patentes específicas para reatores, com maioria tratando da tecnologia/equipamento em si. Os processos de coagulação foram classificados em reatores, mas somente uma (1) patente foi solicitada. Entre os biorreatores, os processos fermentativos têm destaque. Em sua maioria, os reatores estão associados a filtração, estabilização e lodos ativados.

Os processos de filtração por membrana também apareceram associados a outros. Em sua maioria, tratam-se da aplicação das membranas no próprio filtro em um único equipamento que também tem etapas de reação ou estabilização do efluente. Tecnologia utilizando osmose reversa ou adsorção foram menos recorrentes.

As únicas duas patentes que utilizaram osmose reversa estavam associadas a filtração em membranas, utilizadas como processo avançado para obtenção de água para reuso. Em relação a adsorção, somente 4 patentes apresentaram a tecnologia: adsorção química, adsorção catalítica, adsorção utilizando compósito de resíduos plásticos e eletro-adsorção. A eletro-adsorção foi aplicada ao tratamento de água de resfriamento, mas apresentou resultados positivos analisados para utilização em efluente e obtenção de água para reuso.

4.2.3. Prospecção a longo prazo: artigos científicos

Os artigos científicos são documentos fontes de informação tecnológica, utilizado, principalmente, no meio acadêmico e científico em que apoia outros pesquisadores em estudos já realizados ou a fim de guiar novas pesquisas. Balizado neste conceito de tecnologias ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, no *roadmap*, entende-se que a aplicação dos mesmos está atrelada a longo prazo. Desta forma, a pesquisa foi realizada como apresentado a seguir:

- Database: *Scopus*
- Palavra-chave: (URBAN OR MUNICIPAL OR WASTEWATER OR SEWAGE) AND TREATMENT AND TECHNOLOG* AND WATER AND (REUS* OR RECYCL*)
- Campo de busca: Título, Resumo e Palavra-chave
- Documentos encontrados: 8.141

Das diversas combinações de palavras-chave para serem utilizadas, optou-se por manter a busca acima e garantir maior número de informações e pesquisas sobre o tema em questão. Com as possibilidades do próprio *Scopus*, foram utilizadas as estratégias listadas abaixo para filtrar as informações obtidas nos 8.141 documentos encontrados:

Tabela 11 – Refinamento de Artigos Científicos no *Scopus*

Refiro da busca	Filtros utilizados
Ano	2013-2023
Área (Matéria)	*Environmental Science* *Chemical Engineering* *Chemistry*
Tipo de documento	*Article* *Review*
Palavras-chave	*Wastewater Treatment* *Recycling* *Waste Water Recycling*
Open acess	*All Open Acess*

Fonte: Autora, 2024.

A busca resultou em 856 documentos que foram exportados do *Scopus* em formato de arquivo em Excel. A estratégia de organização dos artigos e documentos em Excel, citada por Borschiver e Silva (2016) garante um conhecimento adequado com facilitação da leitura e estabelecimento das classificações pertinentes à pesquisa (Monteiro, 2022). Principalmente devido ao volume de artigos encontrados.

Após realizar as leituras dos títulos e resumos, os documentos foram reduzidos a 87 artigos que abordam o tema. Na leitura dos artigos, pode-se notar a relevância do tema e o quanto os conceitos de economia circular e reaproveitamento dos recursos vem sendo investigados academicamente.

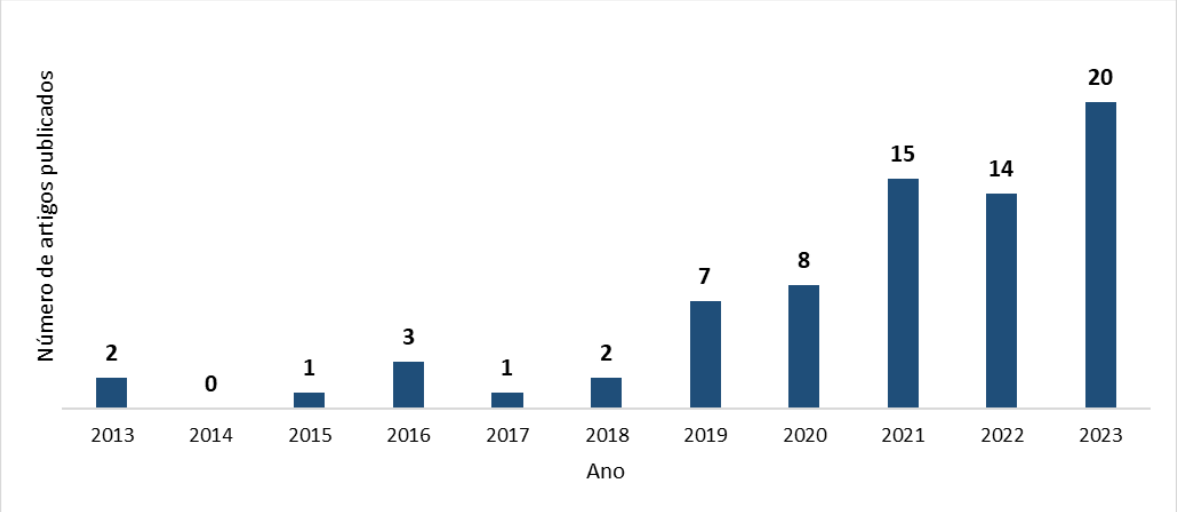
Diversas áreas específicas podem ser explorados para estudos futuros, como recuperação de compostos presentes no efluente, remoção de fármacos, reaproveitamento de resíduos sólidos, energia e etc. Após uma leitura minuciosa

dos resumos e dados dos 87 artigos destacados, 73 destes apresentavam tecnologias ou arranjos com objetivo de produzir água para reuso (APÊNDICE C).

4.2.3.1. Análise Macro

Com a variação histórica de 10 anos – entre 2013 e 2023 – a distribuição dos documentos por data de publicação está apresentado na Figura 27. É relevante notar o aumento na publicação de artigos científicos relacionados ao tema, evidenciando o crescente interesse da comunidade cientifica no desenvolvimento de técnicas adequadas ao assunto. O ano de 2023 detém o maior número de publicações, com um total de 20 artigos publicados.

Figura 27 – Série histórica dos artigos científicos publicados

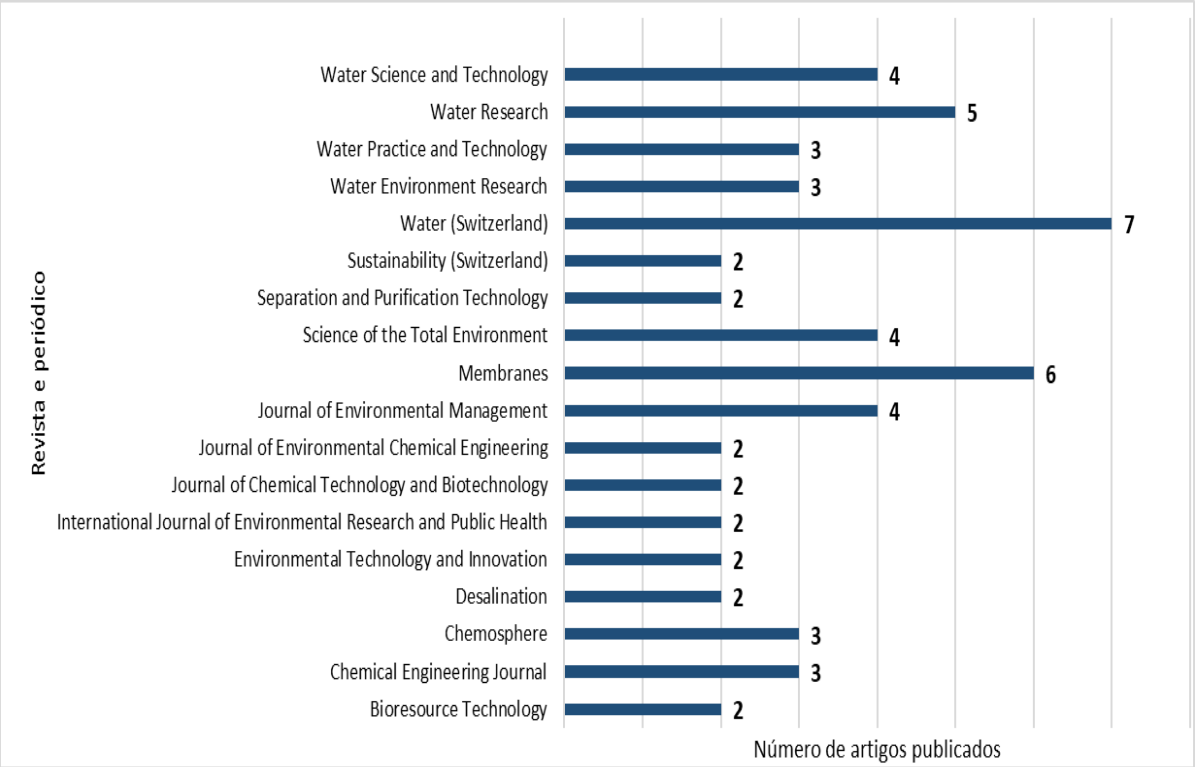


Fonte: Autora, 2024.

Em relação aos periódicos, os 73 artigos científicos dividiram-se entre 33 revistas. Destas, foram destacadas na Figura 28 os periódicos com dois ou mais

publicações. Sua maioria entre periódicos relacionados a tecnologias, práticas e pesquisas sobre água, tema central da dissertação. Mas, é importante destacar as 6 publicações em uma revista sobre membranas.

Figura 28 – Revistas com 2 ou mais artigos científicos publicados entre 2013-2023



Fonte: Autora, 2024.

4.2.3.2. Análise Meso

Com base nos artigos selecionados, a análise meso visa alocar os documentos nas subcamadas do *roadmap*. Os 73 artigos científicos selecionados enquadravam-se nas subcamadas definidas para o *roadmap* em questão. Foi

observado que os resumos, objetivos e resultados dos artigos abrangem por completo, de forma meso, a taxonomia, conforme Tabela 12.

Assim como as patentes concedidas e patentes solicitadas, os artigos científicos selecionados enquadram o tipo de processo e tecnologia utilizada para obtenção de água de reuso e apresentarem direcionadores e tendências para aplicação e mercado.

Tabela 12 – Quantidade de artigos científicos publicados por subcamada do *roadmap*

Subcamada	Artigos científicos publicados
Tendências e Direcionadores	73
Processo de Tratamento	73
Tecnologia de Tratamento	73

Fonte: Autora, 2024.

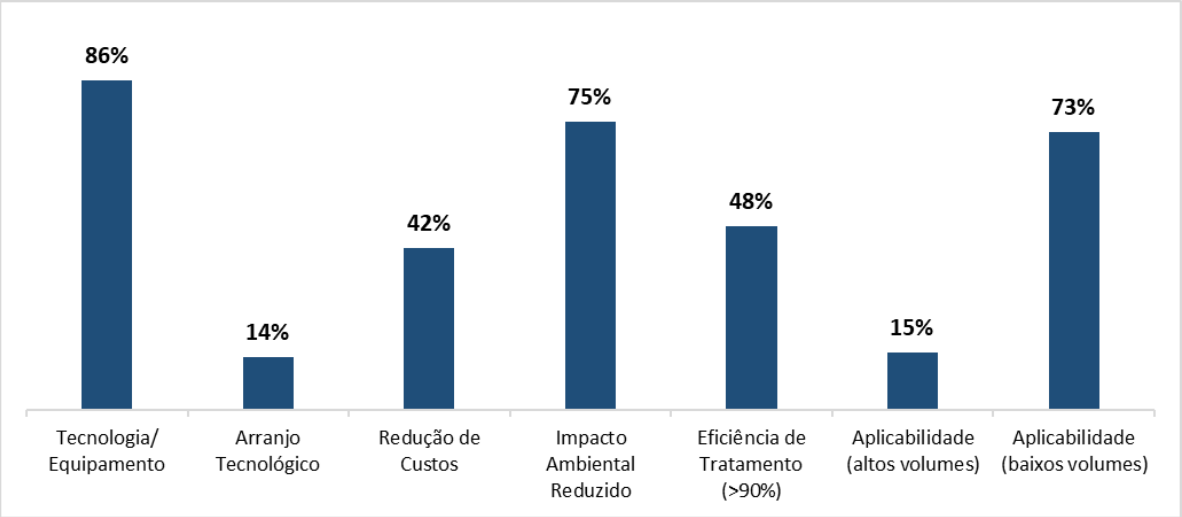
4.2.3.3. Análise Micro

O detalhamento dos resultados obtidos é apresentado nesta análise micro. Iniciando com as tendências e direcionadores, os artigos foram organizados e analisados dentro das 7 características que compõe a subcamada, conforme Figura 29. Para os artigos científicos, 86% dos estudos abordaram tecnologias específicas para o tratamento de efluente com obtenção de água com qualidade suficiente para aplicações em reuso. Em contrapartida, 14% apresentaram arranjos entre operações unitárias convencionais para alcançar padrões de reuso.

A qualidade da água reciclada é de suma importância, conforme já explicitado nesta dissertação. Dentre os artigos selecionados, 48% deixaram explicito em seus resumos e principais dados uma eficiência acima de 90% de

remoção de carga orgânica, bactérias e/ou vírus. O que não invalida o resultado da pesquisa, visto que todos os artigos selecionados observaram que a qualidade obtida é superior aos tratamentos convencionais hoje praticados.

Figura 29 – Porcentagem de artigos científicos por classe de "Tendências e direcionadores"



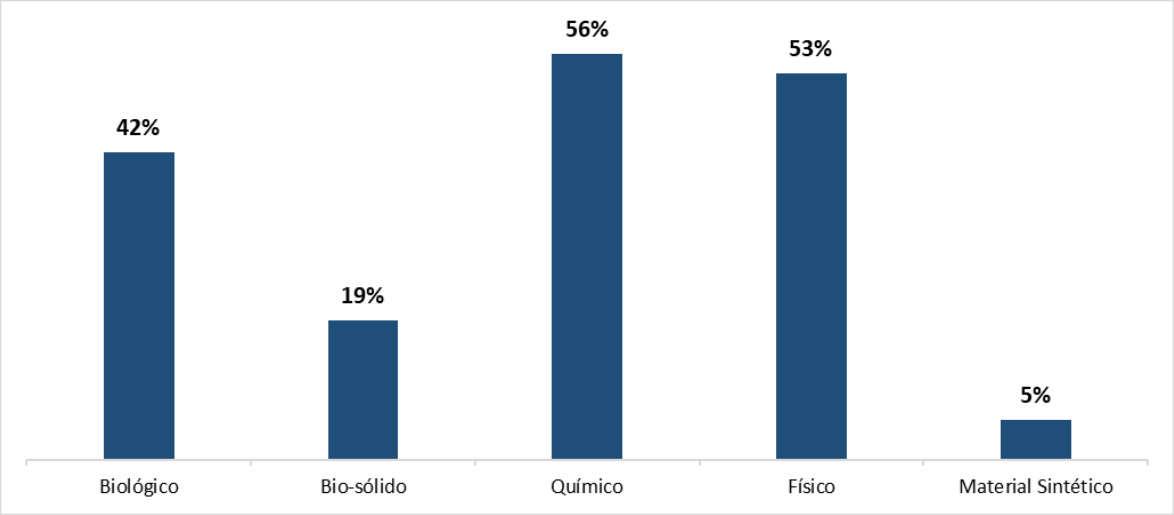
Fonte: Autora, 2024.

A redução de custos e redução do impacto ambiental estão intrinsicamente interligadas quando se trata de reaproveitamentos dos recursos e produtos obtidos no processo de tratamento. No entanto, mais de 50% dos artigos sugeriam que o custo da tecnologia era de fato superior às tecnologias tradicionais. Embora apresentassem resultados superiores ao alcançados atualmente na qualidade da água, os custos gerais poderiam ser um empecilho em suas aplicações.

De um modo geral, as pesquisas realizadas e publicadas estavam em escala piloto ou testes de bancada. Somente 15% dos artigos aplicaram suas tecnologias em plantas reais ou estenderam suas conclusões a aplicações para maiores escalas. Por isso os artigos científicos são alocados como tecnologias a longo prazo: são obtidos ótimos resultados, mas ainda em etapa de testes e prospecção.

Dentro da segunda subcamada da taxonomia, “Processo de Tratamento”, os artigos foram analisados sob a classe principal do insumo utilizado no processo de produção de água para reuso. O resultado da observação está apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Porcentagem de artigos científicos por classe de "Processo de tratamento"



Fonte: Autora, 2024.

Dos processos biológicos e bio-sólidos, pode-se destacar os processos convencionais de lodos ativados, algas, agentes microbiológicos e plantas utilizadas em zonas úmidas, que são as chamadas soluções baseadas na natureza. Para estes casos, a maioria dos artigos estudaram diferentes agentes em processos já convencionais, como *wetlands* e lagoas, a fim de se obter melhores resultados para águas de reuso.

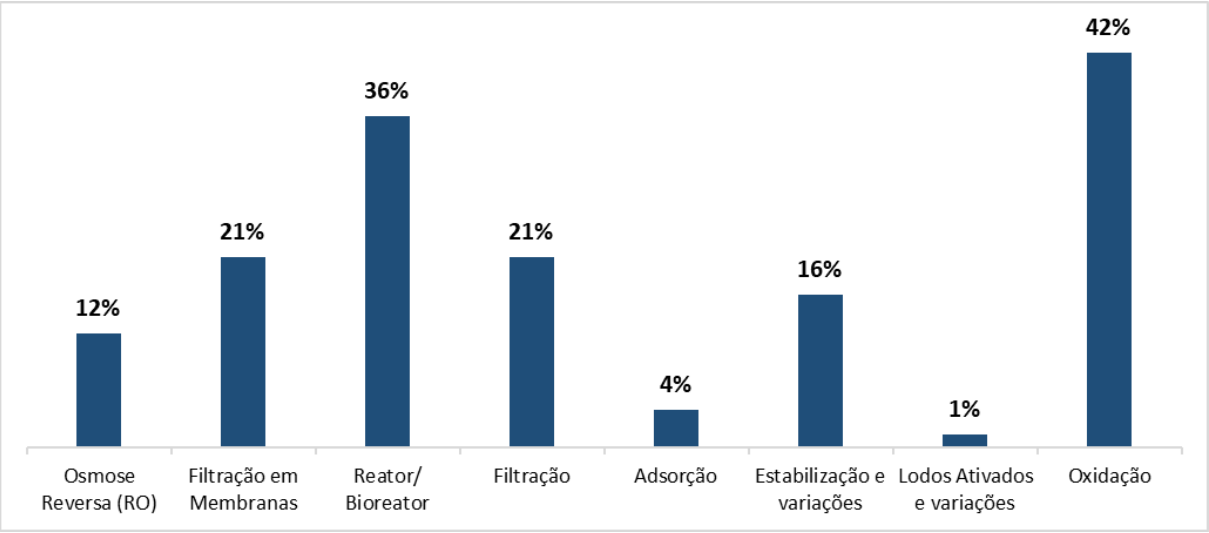
No entanto, o destaque está para os processos químicos, físicos e principalmente físico-químicos, como pode ser observado na distribuição da Figura 30. A análise em conjunto com a Figura 31**Erro! Fonte de referência não encontrada.** permite ressaltar algumas considerações: os reatores e biorreatores seguem sendo destaques nos processos de tratamento de efluentes, assim como destacados nas patentes concedidas. Mas, notou-se uma tendência significativa

em dois universos nos artigos: processos com membranas e processos oxidativos.

Dentre as tecnologias de “Filtração em Membranas” destacaram-se artigos que aplicam a técnica com os biorreatores, e membranas de ultra e nanofiltração. Membranas de celulose, fibra oca, nanotubo de carbono foram investigadas. O tema a respeito de tecnologias por membranas já é bastante conhecido no meio científico, e observou-se um aumento nas publicações nos últimos anos.

Pôde-se destacar, com base nos artigos selecionados, que os maiores inconvenientes dos processos por membranas são custo, recuperabilidade e limitações em aplicações para maiores volumes e vazões. Além disso, um (1) artigo sinalizou a atenção para os resíduos obtidos nos processos de osmose reversa: apesar de alcançar um efluente tratado com elevada qualidade em termos de reuso, os resíduos do processo de osmose reversa podem ser tóxicos e perigosos ao meio ambiente (Mangalgiri *et al.*, 2021).

Figura 31 – Porcentagem de artigos científicos por classe de "Tecnologia de tratamento"



Fonte: Autora, 2024.

Dentre os artigos selecionados e classificados em “Reatores/Biorreatores”, dois correspondiam a um fotobiorreator utilizando microalgas (Díaz *et al.*, 2022; Bellucci *et al.*, 2020) e um biorreator de membrana (MBR) com células de eletrólise microbiana em que a o processo consiste no uso de biomassa e bactérias eletroativas (El Kik *et al.*, 2021).

Os demais artigos tratavam-se de biorreatores de membrana (MBR) em que os processos consistem em aplicações com biofilmes bacterianos, microalgas, carvão ativado, zeólitas e fibra oca, por exemplo. Ainda dentro do tópico, os três processos físico-químicos que utilizam eletroquímica foram alocados em reatores. Dois deles células eletroquímicas microbianas (Khan *et al.*, 2019; Araneda *et al.*, 2018) e um de eletrocoagulação com biocarvão (Lobo *et al.*, 2016).

Os processos em destaque são os processos de “Oxidação” que detém o maior número de indicações nos artigos selecionados. A tendência observada é da aplicação de processos oxidativos como um tratamento avançado ou associado a alguma outra tecnologia para produção de água para reuso. Conforme a Tabela 13, existe considerável ocorrência bioprocessos com exemplo de radiação solar, biocarvão e cascas de arroz.

Tabela 13 – Tecnologias aplicadas aos processos oxidativos

Oxidação	Tecnologia específica
Coagulação e desinfecção	Cloreto férrico e radiação solar
Fenton	$Fe^{2+}/S_2O_8^{2-}$ e Fe^{2+}/H_2O_2
Fotocatálise heterogênea	Óxido de cobre
Fotocatálise heterogênea	Oxido de zinco (ZnO)
Foto-fenton (fotorreator)	Fe^{3+}, H_2O_2 e NaOCl
Oxidação	Ferrato
Oxidação	Radiação solar
Oxidação	Ferrato
Oxidação (Fotocatálise)	ZnO em Fe_3O_4
Oxidação avançada - TADOX	UV-TiO2
Oxidação catalítica	Peroxidissulfato com óxido de cobre
Oxidação catalítica	UV/MnO_2, UV/H_2O_2/MnO_2 e O_3/MnO_2/H_2O_2
Oxidação catalítica - Filtração reativa	Ferro-ozônio (Fe-CatOx-RF)
Oxidação catalítica - Filtração	Biocarvão (BC-RF) e ferro-ozônio (Fe-CatOx-RF)

reativa	
Ozonização + filtração	Ozônio
Ozonização catalítica	Carvão ativado e casca de arroz
Ozonização catalítica	Rocha vulcânica
Pré-oxidação e ultrafiltração	Peroximonossulfato (PMS) ativado por Fe(II)
Processo fotoquímico solar	Peroximonossulfato (PMS) e radiação solar
Processo IMA (oxidação)	Oxigênio dissolvido e ferro
Reator LED-UV	Luz ultravioleta
Ozonização catalítica - Filtração reativa	Biocarvão
Oxidação avançada – (Foto-fenton)	H_2O_2 e radiação solar

Fonte: Autora, 2024.

Vale enfatizar que Tabela 13 foram citados os principais insumos para o processo oxidativo, o que não significa que os artigos não apresentem outros materiais usados em conjunto.

4.3. Fase Pós-Prospectiva: elaboração do *roadmap*

Utilizando os dados obtidos no item 4.2, este subcapítulo os organiza de forma clara e visual com a exposição das informações apresentadas. De modo a realizar uma consolidação gráfica, conforme descrito na metodologia desta dissertação. O mapa apresenta os atores alocados na camada de **TECNOLOGIA** – objetivo central da dissertação – centralizado na subcamada referente a classe principal do mesmo.

O ponto final das setas apresenta a interseção com as demais subclasses que a tecnologia (ou arranjo) pode apresentar. Logo, ao observar um ator (cessionário) alocado sob duas linhas horizontais próximas, isso significa que ambas as subcamadas correspondem àquele ator.

Cabe ressaltar que as subcamadas foram definidas com base nas pesquisas preliminares realizadas na revisão bibliográfica desta dissertação e o que foi sendo observado na leitura dos documentos e informações encontradas. E

de acordo com os aspectos e caraterísticas mais abordadas tratando-se do tema: meio ambiente, políticas ESG, escassez hídrica, ODSs, vantagens ambientais e reutilização dos recursos.

A fim de facilitar a leitura dos gráficos, é indicado ao leitor estar com o item [3.3.2.1 Taxonomia: aspectos mais relevantes] em paralelo. A ordem em que os atores são apresentados dentro da alocação temporal em que se encontram não tem ligação com a ordem cronológica em que o documento ou a tecnologia foi publicado.

4.3.1. *Roadmap* do estágio atual

Neste estágio optou-se por apresentar as tecnologias praticadas atualmente no contexto do Brasil. Essas tecnologias já estão em operação e encontram-se no portfólio de marcas específicas ou são projetados por empresas especializadas de acordo com o dimensionamento adequado.

O resultado do *roadmapping* está apresentado na Figura 32, é possível notar que atualmente no país não existem tecnologias específicas que busquem como foco reutilizar o efluente tratado. Na prática, são arranjos em plantas até o nível terciário e quando investido no tema, podem chegar a processos de nível quaternário.

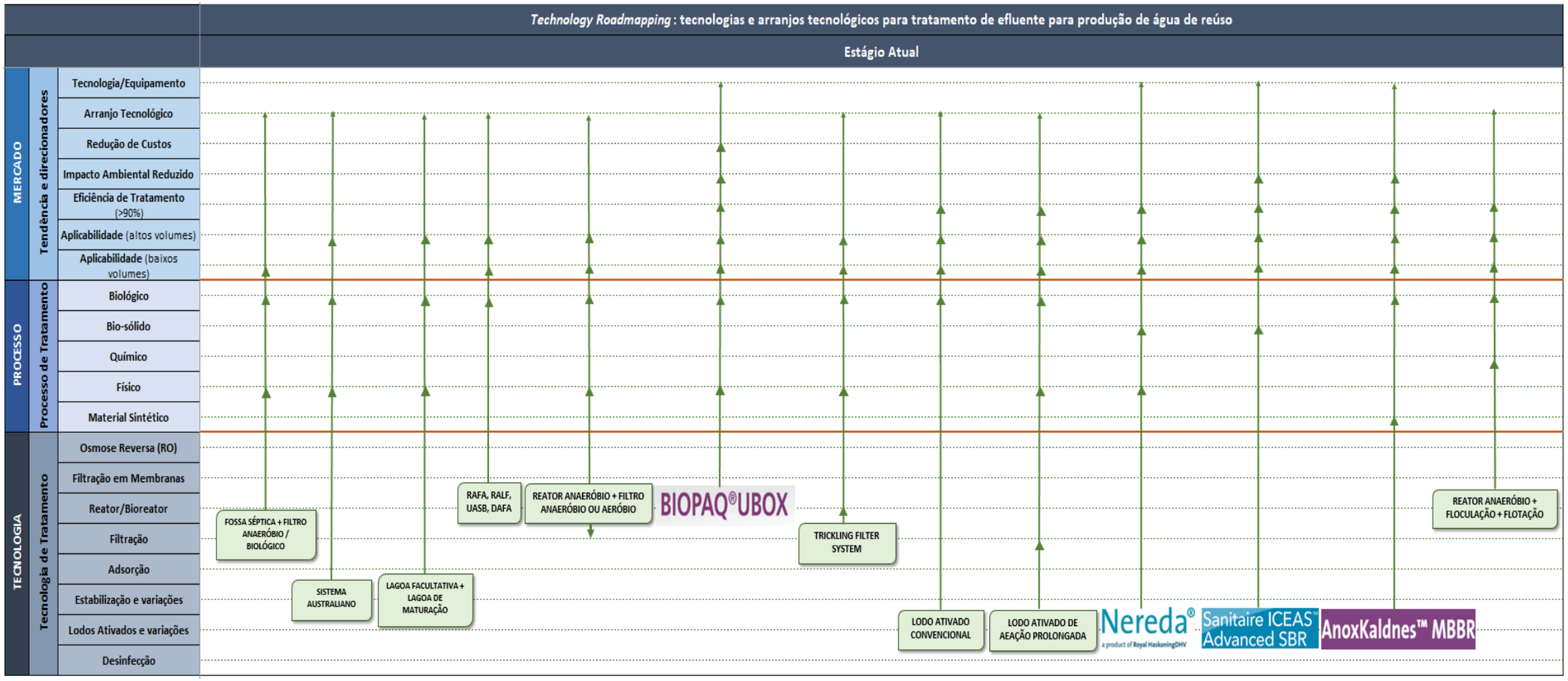
Em alguns municípios como Rio de Janeiro, por exemplo, ou cidades tão grandes quanto, em termos populacionais, é possível encontrar os caminhões de água não-potável para lavagens de ruas e áreas comuns. Geralmente são utilizados água a nível secundário, ou “água secundária”. Esse efluente secundário ainda não garante qualidade suficiente para demais usos mais nobres, por isso se restringem a lavagens de vias e desobstrução de galerias de efluente urbano.

Boa parte dos processos hoje são reatores (abertos ou fechados) e principalmente de lodos ativados, sendo ainda possível encontrar sistemas de lagoas. Quase que em totalidade são processos biológicos associados a processos físicos, como sedimentação e/ou filtração.

Em termos de mercado, os arranjos ou processos podem ser aplicados tanto para altos volumes tratados quanto para baixos volumes, dependendo somente do dimensionamento correto de cada etapa do tratamento. Alguns processos apresentam eficiência relativamente boa, com redução de carga orgânica acima de 90%, mas não são maioria.

Em termos de impacto ambiental poucos são os atores que atendem essa demanda. De um modo geral, as concessionárias ou municípios atendem o padrão de lançamento para o resíduo liquido e destinam grandes volumes de lodo gerado. Além dos gases não reaproveitado em eficiência energética.

Figura 32 – *Technology Roadmapping*: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Estágio Atual



Fonte: Autora, 2024.

Em suma, o estágio atual no Brasil não é favorável quando se trata de reuso de águas. Seriam necessários altos investimentos para adequações, ou em opções melhores, iniciar do zero. Isso será discutido mais à frente.

4.3.2. *Roadmap* a curto prazo

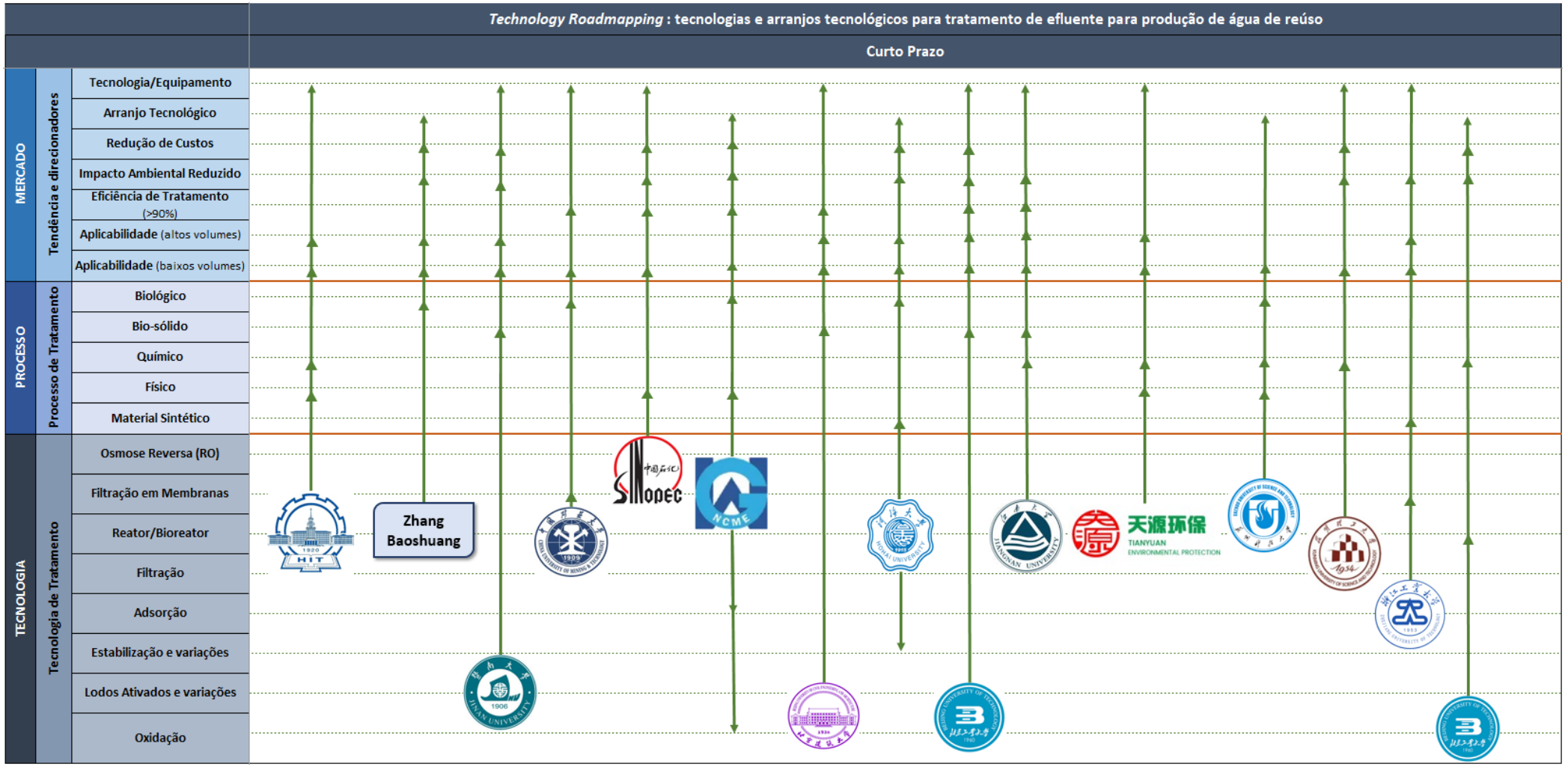
O *roadmap* a curto prazo corresponde aos atores que possuem patentes já concedidas na alocação temporal em um período de busca de 10 anos. O fato de ser a curto prazo indica que essas tecnologias ou arranjos patenteados são relativamente novos e já estão disponíveis para implementação.

Pelo volume de dados apresentados, na Figura 33 é possível sinalizar o quanto o tema ainda está em início de discussão. Obter água de reuso em padrões para agricultura ou jardinagem requer um certo grau em termos de padrões de qualidade. É um padrão além daquele atingido pelo produto de um tratamento a nível secundário.

Em totalidade, as patentes concedidas separadas são de origem chinesa, provenientes de universidades ou institutos. Exceto uma patente (Apêndice A; CN107055971), de autoria de Zhang Baoshuang, que patenteou um método de reciclar esgoto doméstico para reuso. Corresponde a um arranjo tecnológico cujo o foco principal é o biorreator. O método de reciclo garante uma redução do impacto ambiental e consequentemente redução dos custos, mas não apresentou dados específicos quanto a qualidade de forma a garantir os padrões determinantes pelos aspectos legais (vide item 1.3.) no Brasil.

Abrindo as camadas da taxonomia, em termos de tecnologias, destaca-se ainda, assim como no estágio atual, os reatores ou biorreatores. Que podem estar associados ou não a filtração. Processos avançado, como processos em membranas e oxidativos começam a aparecer neste estágio do *roadmapping* com maior frequência.

Figura 33 – *Technology Roadmapping*: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Curto Prazo



Fonte: Autora, 2024.

Cabe uma observação importante em que uma das tecnologias patenteadas, concedida em 2021, trata-se de um agente floculante para o tratamento do esgoto. Devido a reação deste agente floculante com o esgoto bruto, a patente foi alocada em “reator” (Apêndice A; CN112358022). É um processo físico-químico, mas em termos de mercado, só apresentou uma boa aplicabilidade para variações de volume tratado. Nas demais, não houve direcionadores.

Um destaque importante cabe ao nono ator apresentado no mapa, Universidade de Beijing (Apêndice A; CN103145294) em que um processo de tratamento baseado em uma tecnologia de lodo granular (2013) acrescido de polimento efluente com oxidação, apresentou todas os direcionadores da camada de mercado.

A Universidade de Beijing apareceu como requerente em outras duas tecnologias nesta alocação temporal: um método de aplicação de coque ativo modificado (Apêndice A; CN103894151), da universidade de engenharia e arquitetura e um método combinado de nitrificação/desnitrificação em aeração intermitente com oxidação anaeróbica da amônia (Apêndice A; CN109019862).

Metade das patentes apresentadas mostraram direcionadores apara redução de impacto ambiental e consequente redução do custo. No entanto, é de conhecimento da área que processos com membranas são custosos apesar de bastante eficiente. Nesta alocação temporal, houve três processos em destaque com aplicação de membranas (Apêndice A; CN104528935; CN104230076; CN102863124). Todos para menores capacidades de volumes de esgoto tratado.

4.3.3. *Roadmap* a médio prazo

O mapa tecnológico referente ao *roadmapping* a médio prazo está apresentado na Figura 34 e Figura 35. Nele são apresentados os atores correspondentes as patentes solicitadas dentro do intervalo temporal de 10 anos.

Assim como as patentes concedidas, as patentes solicitadas selecionadas são em totalidade de origem chinesa. Neste corte temporal é possível perceber

maior incidência de requerentes sem vínculo institucional, institutos e até mesmo um volume considerável de empresas.

Para a maioria dos atores não correspondentes a universidade houve significativa dificuldade de se encontrar logotipos ou logomarcas para serem representados no mapa, e para estes, então, foram adicionadas as indicações da razão social. Em casos de dúvidas, é possível consultar os Apêndice B e Apêndice C.

Em relação aos atores, a Universidade de Beijing tem destaque com o maior número de publicações dentre os selecionados (Apêndice B; CN115611408, CN116332352, CN114772724 (A)), em dois deles trabalhando com lodo fermentado (ou fermentação do lodo) e adição do mesmo no processo em etapas.

O Instituto de Tecnologia Harbin também aparece com duas publicações selecionadas, ambas trabalhando com pirita. O primeiro (Apêndice B; CN116495867 (A)), e inclusive o primeiro no *roadmap*, corresponde a um método de tratamento (e por isso alocado em tecnologia/equipamento) para efluentes secundários. Este método utiliza persulfato ativado com pirita reforçada com ferro.

Esse efluente secundário é tratado a partir de um processo de oxidação avançada e uma das grandes vantagens dessa tecnologia é que os altos volumes de lodo gerado em processos de oxidação avançada é diminuído significativamente a partir de uma recirculação de Fe(III)/Fe(II) no sistema. Sendo assim, a tecnologia fornece bons resultados para remoção de poluentes do efluente urbano, reduz a produção de lodo e fornece possibilidade de reuso desse efluente tratado.

A segunda publicação selecionada do instituto (Apêndice B; CN116462293 (A)) trata-se de um arranjo em que é realizado coagulação e sedimentação do efluente secundário com adição de Fe(III) e um agente oxidante (não especificado). Esse efluente é alimentado em um filtro de pirita. A lavagem desse filtro é realizada quando a remoção dos poluentes está abaixo de 80%. Segundo o método, o tratamento é feito a partir de uma oxidação e filtração síncrona.

O apresentado nos parágrafos anteriores juntamente com a discussão feita no item 4.3 é o resultado de uma boa aplicação do *roadmap*. A ideia central da técnica é verificar tendências e a correspondência a seus cessionários. Pode-se

considerar, então, o instituto Harbin como referência a respeito da aplicação de composto férrico e pirita para tratamento de efluentes secundários e posterior aplicação para reuso.

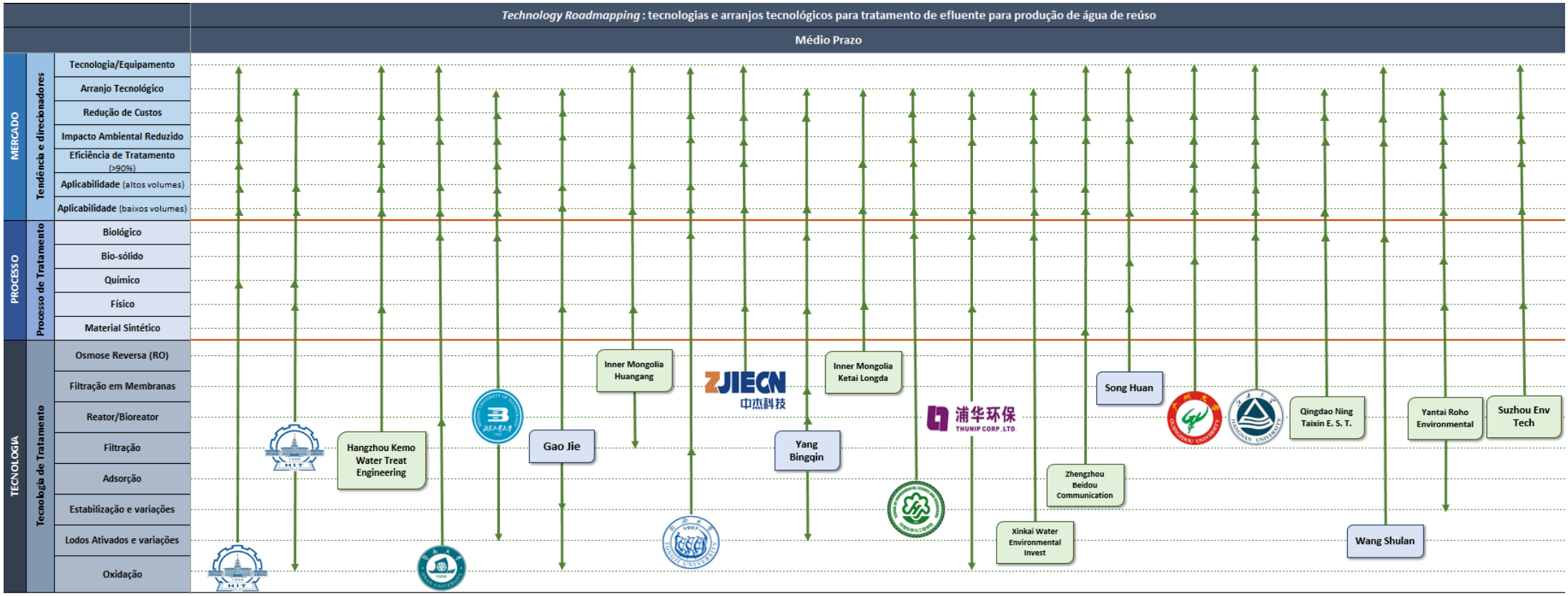
Em termos da camada tecnologia, para as patentes concedidas, os reatores/biorreatores e as suas mais comuns variações são de maior incidência, correspondendo a mais da metade das patentes selecionadas. Quando se trata de aplicação a médio prazo, já é notado uma maior variação em termos das tecnologias. Mais de 50% dos documentos de patentes solicitadas tratam-se de tecnologias ou equipamentos, mas é possível observar que mais de 60% são junções dos conceitos das diversas tecnologias em uma.

Não foi encontrado padrão nos atores que são cessionários sem vínculo com empresas ou instituições. As tecnologias que envolvem membranas foram mais comuns entre empresas quando comparado as instituições de origem: Inner Mongolia Huangang Environmental Protection Technology Co., Ltd. (Apêndice B; CN214088026), Jinchang Zhongcheng Tech Co., Ltd. e Anhui Zhongcheng Information Tech Co., Ltd. (Apêndice B; CN111794309 (A)), Inner Mongolia Ketai Longda Environmental Protection Tech Co Ltd (Apêndice B; CN111348765 (A)), Tianjin Huaqing Huanyu Environmental Protection Technology Co., Ltd. (Apêndice B; CN209098439), Yunnan Aoyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd. (Apêndice B; CN107055787), Dalian Radlant Water Dispose Technology Co., Ltd. (Apêndice B; CN104058552).

Tecnologias de processos com membranas tem custo elevado de manutenções e as aplicações são melhores em volumes baixos. Geralmente, se destacam quando comparado a outros em termos de resultados qualitativos da água produzida. No entanto, apesar disso, o *roadmap* mostrou que na prática continuar o investimento nas tecnologias triviais tem sido mais comum, como reatores, filtros, enriquecimentos de lodo e estabilizações.

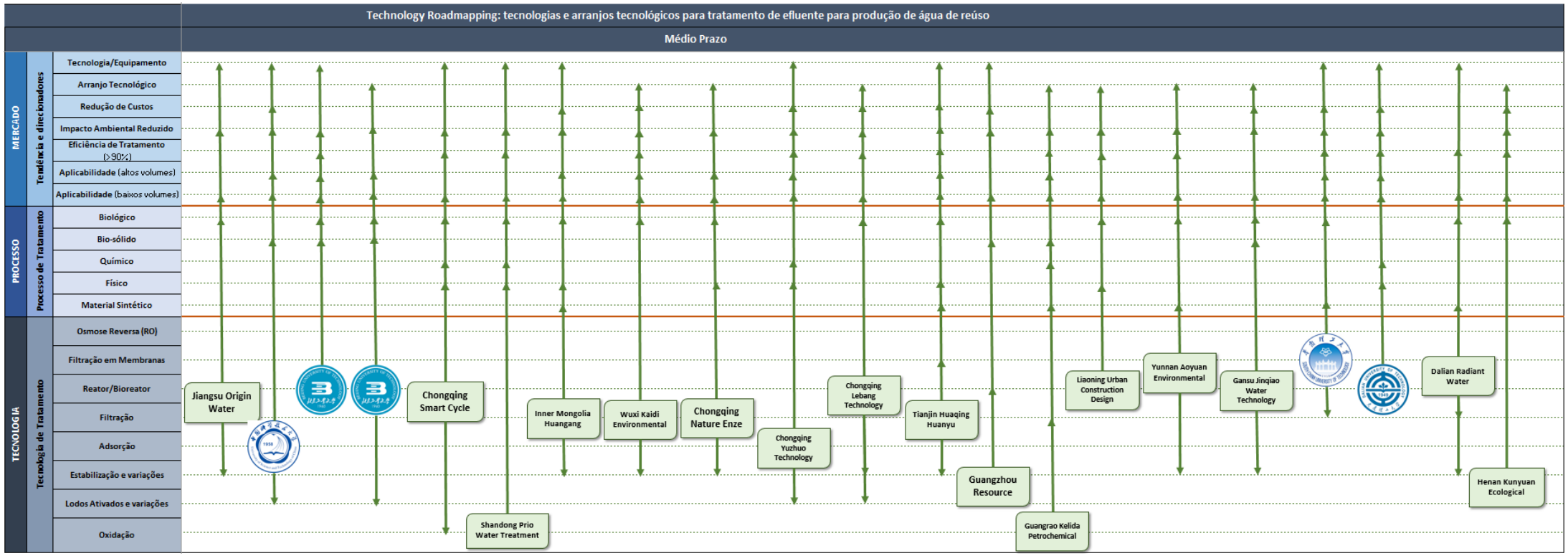
Dentre as patentes que aplicam um agente para floculação ou para enriquecimento de lodo, um destaque é para Univ Guangzhou (Apêndice B; CN104944570 (A)) em que desenvolveu um método de preparação e aplicação de carvão ativado a base do lodo. Apesar de ser focado na emissão zero e recuperação do lodo produzido, também garante qualidade ao tratamento de modo que possibilite o reuso dos recursos residuais, como a água produzida.

Figura 34 – *Technology Roadmapping*: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Médio Prazo (a)



Fonte: Autora, 2024.

Figura 35 – *Technology Roadmapping*: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Médio Prazo (b)



Fonte: Autora, 2024.

4.3.4. *Roadmap* a longo prazo

Os maiores números de documentos encontrados no processo de *roadmapping* correspondeu a alocação temporal a longo prazo. Isto é, tecnologias e alternativas ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, o que justifica o grande volume de material. O mapa, produto do método, foi dividido em 4 partes conforme apresentado na Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39.

Em termos de distribuição por países, houve publicações de 31 diferentes países. O maior número de publicações por país tem EUA (15), seguido de Espanha e Índia (9 cada um), Itália (4) e os demais com 3 ou menos publicações. O Brasil não apareceu na lista dos artigos selecionados.

Diferente dos itens anteriores, curto e médio prazo, a aplicação temporal a longo prazo não foi totalizada por documento de origem chinesa. Pelo contrário, só houveram dois artigos selecionados: Nanjing University of Science and Technology com a Yonsei University e outro da Harbin Institute of Technology.

Como já mencionado, o efluente secundário de uma estação de tratamento de esgoto urbano pode ser um recurso em mãos a ser submetido a um polimento através da aplicação de tratamento avançados. E é nesse sentido que o *roadmap* se direcionou a longo prazo: tratamentos avançados.

A Nanjing University iniciou um estudo de oxidação avançada similar ao processo *photo-fenton*. Os testes ainda em escala industrial têm como base os conceitos da tecnologia fotoeletroquímica utilizando somente água, oxigênio e luz solar para reproduzir reações tipo photo-fenton. Pelos resultados, o artigo menciona e destaca ser viável os testes para aplicações descentralizadas.

As tecnologias de membranas como osmose, ultrafiltrações e demais níveis de aplicações tem como produto ótimos resultados em termos de qualidade. No entanto, um dos grandes inconvenientes são as incrustações que ocorrem nas membranas. Neste sentido, o artigo publicado pela Harbin Institute of Technology desenvolveu um método de coagulação e pré-oxidação do efluente secundário utilizando peroximonossulfato (PMS) ativado com Fe(II).

Diferente do que aconteceu na tendência para curto e médio prazo, o *roadmap* a longo prazo apresentou diversos artigos, publicados por universidades

ou parcerias entre universidades, instituições e empresas, utilizando tecnologias e processos de oxidação. As tecnologias comumente praticadas, como reatores, filtração e estabilização apareceram, mas, a respeito de lodos ativados ou variações, somente 1% de publicações.

Interessante observar que a longo prazo, as pesquisas acerca do tratamento de efluente urbano a nível avançado tem se direcionado a membranas, processos eletroquímicos e oxidativos. De maneira geral, membranas e oxidação foram os tópicos principais abordados nos artigos selecionados.

Os atores cessionários dos principais artigos selecionados a respeito de oxidação foram: University of Idaho, University of Rhode Island; Debre Berhan University; University of Miami; Joint Centre of the University of Almería-CIEMAT; Universidad de las Américas Puebla; Vellore Institute of Technology (VIT); Asian Institute of Technology; University of Engineering and Technology; University of Montpellier; University of Coimbra; Texas A&M University; University of Salerno; Anna University; TADOX® Technology Centre for Water Reuse; The Energy and Resources Institute (TERI); Indira Gandhi National Tribal University; Universidade do Porto; University of Bío Bío. A lista de documentos está no Apêndice C.

Dentre os atores selecionados, foram encontradas duas publicações do TERI (The Energy and Resources Institute), na Índia. Uma do instituto e outra do centro de águas para reuso (que faz parte do instituto). Ambas foram sobre a tecnologia TADOX®, a qual utiliza de nanotecnologia combinada com processos de oxidação avançada (fotocatálise UV-TiO_2) que alcança a degradação e mineralização dos poluentes foco da remoção.

Devido à baixa eficiência e até mesmo algumas limitações dos processos biológicos convencionais para remoção principalmente de componentes tóxicos, o artigo publicado em 2022 pelo TERI apresentou um estudo de caso para a aplicação da tecnologia em três cenários: águas residuais fenólicas de uma empresa de pesticidas e de uma indústria química, e águas residuais de indústria do setor de petróleo.

Apesar de não ser exatamente a classe de efluente abordada nesta dissertação, é importante reforçar esta aplicação da tecnologia visto que em diversos locais no Brasil, por exemplo, as redes não são separadoras e há

deficiência na coleta de esgoto. Assim, várias interferências nos efluentes captados podem ocorrer com diversos produtos que necessitarão de atenção para sua remoção, principalmente no caso de aplicação desta água produzida para reuso em áreas que permitam o contato direto com solo, animais e pessoas.

O artigo considerou a aplicação da tecnologia em etapas do tratamento para avaliar a intervenção da técnica nos resultados da água produzida: fase pré-biológica e fase pós-biológica. O objetivo é que a introdução na fase pré-biológica auxilie o processo principal de tratamento – processo biológico – com redução da DQO, aumentando a biodegradabilidade (DBO/DQO), principalmente com a redução de compostos tóxicos. Na fase pós-biológica, o intuito é obter o polimento final, com remoção da DQO residual e remoção dos principais parâmetros como cor, turbidez, odor e DBO.

A segunda aplicação da tecnologia, no artigo sinalizado no mapa com a logomarca do instituto, apresenta uma situação mais próxima a desta dissertação. Foi avaliado do desempenho da TADOX® (fotocatálise UV-TiO_2) para polimento de efluente tratado em *wetlands*. Os parâmetros avaliados pelo artigo, publicado em 2023, foram DBO, DQO, sólidos suspensos, cor, patógenos e poluentes persistentes porem mais comuns de serem encontrados, como cafeína, paracetamol, ibuprofeno e diclofenaco.

A University of Idaho apareceu como ator na publicação de três artigos acerca da aplicação oxidação catalítica com filtração reativa (Fe-CatOx-RF) e ainda utilizando biocarvão. Entre essas, um artigo foi em parceria com a Evergreen Water Solutions, uma empresa fornecedora de soluções ambientais no setor de água e esgoto do Reino Unido. Os resultados para remoção de poluentes com as diferentes aplicações da tecnologia, com eficiências de remoção acima de 95% para todos os micropoluentes encontrados e detectados. Essa eficiência ainda foi aumentada com aumento gradual da utilização do biocarvão.

Alguns pontos importantes das diferentes aplicações do método é que: as aplicações em escala piloto do biocarvão (com ou sem a ozonização) alcança um processo neutro ou negativo em carbono, enquanto apresenta uma remoção acima de 90% dos poluentes e patógenos. Em relação aos custos do processo, segundo a modelagem realizada pelos autores, chegou a US$0,11/m³ (cerca de R$0,60/m³) para tratamento de 3.780m³/dia (Taslakyan *et al.*, 2023).

A ozonização catalítica utilizando a carvão ativado e casca de arroz (em proporções iguais para adsorção) foi proposto no estudo publicado pela University of Engineering and Technology. Os resultados apresentaram eficiência acima de 99% para remoção de turbidez, DQO, DBO, coliformes e óleo e graxa. A água produzida cumpriu os padrões de qualidade exigidos pela WWF (*World Wildlife Fund*) para aplicação em irrigação.

A ozonização catalítica utilizando outro adsorvente foi publicado pela University of Coimbra. A tecnologia associou a ozonização com adsorção em rocha vulcânica – material de custo relativamente baixo segundo a universidade. A utilização da rocha vulcânica promoveu remoção de coliformes, principalmente *E. Coli* e vírus.

A University of Miami juntamente com Montclair State University e Zima Group International realizaram uma avaliação da viabilidade técnica e econômica de um processo de aeração mediada por ferro. No processo IMA, o oxigênio é ativado pelo Fe(0) para produzir espécies reativas de oxigênio. O artigo sugere a técnica para polimento de efluentes secundários e águas contaminadas.

As demais tecnologias que abordaram oxidação foram: Radiação solar (Indira Gandhi National Tribal University, University of Bío Bío) luz ultravioleta (Asian Institute of Technology), cloreto férrico e radiação solar (Vellore Institute of Technology (VIT)), óxido de zinco (Texas A&M University, Universidad de las Américas Puebla), óxido de cobre (Debre Berhan University, University of Montpellier com peroxidissulfato), ferrato (University of Rhode Island), photo-fenton/fenton (Joint Centre University of Almería-CIEMAT com University of Almería e Rey Juan Carlos University, University of Salerno).

Os processos com membranas são boas opções quando se trata da alta eficiência em termos de qualidade requerida em um processo de tratamento para produção de água de reuso. No entanto, vários inconvenientes aparecem, e o principal deles é o custo. Desenvolver membranas de baixo custo com flexibilidade para as mudanças que podem ocorrer no efluente bruto têm aparecido como desafio nos artigos levantados a respeito.

A Banaras Hindu University desenvolveu um filtro de nanotubo de carbono reutilizável e flexível, ou seja, os poros podem ser ajustados quanto ao tamanho. Essa característica de poros ajustáveis em processos de membrana e que

garantam bom desempenho mecânico, e reutilizável (sem grandes riscos de perder a membrana) salta aos interesses de se trabalhar com a mesma.

Um artigo interessante para o tema da dissertação foi publicado pela Acciona Agua em parceria com a University of Barcelona. Balizado nos testes realizado com membranas de fibra oca e celulose aplicado a osmose direta, o artigo propôs a construção de uma planta demonstrativa na ETAR (Estação de Tratamento de Águas Residuais) em San Pedro del Pinatar, na Espanha. A proposição é de que a tecnologia seja avaliada para reutilização de águas residuais no setor agrícola (Corzo *et al.*, 2017).

As membranas a base de celulose também foram abordadas pela Universidad Nacional del Litoral, na Argentina. As membranas de celulose conseguiram reduzir a quantidade de coliformes totais e de E. Coli com eficiência acima de 99%. Essa membrana foi dopada com nanoparticulas de prata e os resultados permitiram aplicação da água tratada em irrigações de áreas verdes.

Algas e microalgas também foram insumos utilizados pela International Crop Research Institute for Semi-arid Tropics (ICRISAT) e CSIR-Central Salt and Marine Chemicals Research Institute, no entanto os resultados não foram tão específicos acerca da aplicação e obtenção de água para reuso. Mas se mostrou um caminho promissor.

A combinação da nanofiltração (NF) com processo com ozônio foi publicada pela University of Porto. Esse processo “peroxônio” (NF + O_3/H_2O_2) tem o intuito de contribuir como tratamento avançado em água secundária de uma estação de tratamento de água. Assim, removendo os demais poluentes, o artigo garante o lançamento em corpo hídrico fonte de captação de água para produção de água potável, ou seja, alcança os requisitos de reutilização em áreas verdes.

Sem considerar os documentos em que estava associada, no *roadmap* a longo prazo foram registrados 7 artigos específicos sobre *wetlands*. Com o olhar sustentável, ecológico, pegada hídrica e escassez de água, a *wetlands* é um caminho bastante favorável.

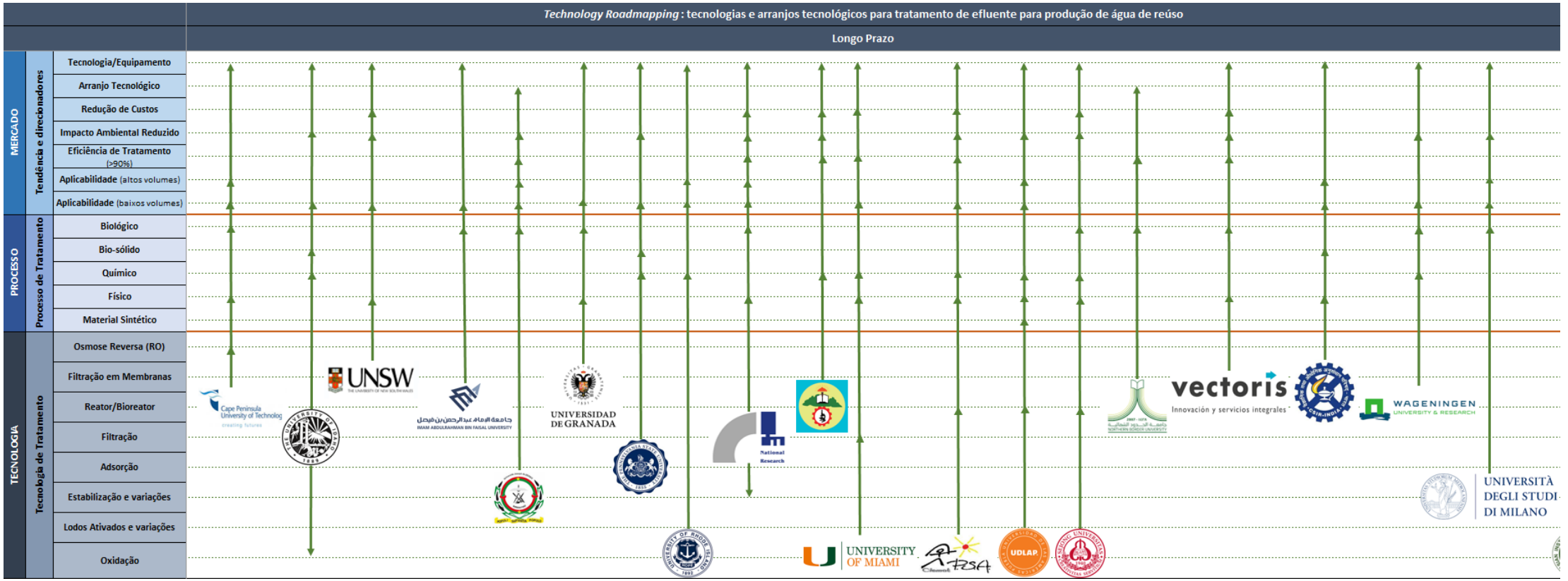
Com foco justamente nestes pontos citados, a Université Joseph KI-ZERBO em parceria com a Université de Fada N’Gourma e Office National de l’Eau et de l’Assainissement avaliou três sistemas plantados com espécies locais do Sahel africano. *Andropogon gayanus* e *Chrysopogon zizanioides* foram as

espécies utilizadas. Os resultados alcançaram as diretrizes da OMS (Organização Mundial da Saúde) para irrigação restrita e jardinagem doméstica.

O Institute for Innovative Phytochemistry and Closed Loop Processes, a University of Barcelona, NITK Surathkal, Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad e a Università degli Studi di Milano publicaram documentos acerca de sistemas plantados, tanto horizontais quanto verticais. Cada um com suas especificações em relação as espécies plantadas, microorganismos, operação, filtros etc. a fim de garantir um objetivo em comum: obter uma alternativa sustentável para o tratamento de águas domésticas, ou seja, esgoto urbano. Essa alternativa pode permitir a possibilidade de reutilização da água produzida.

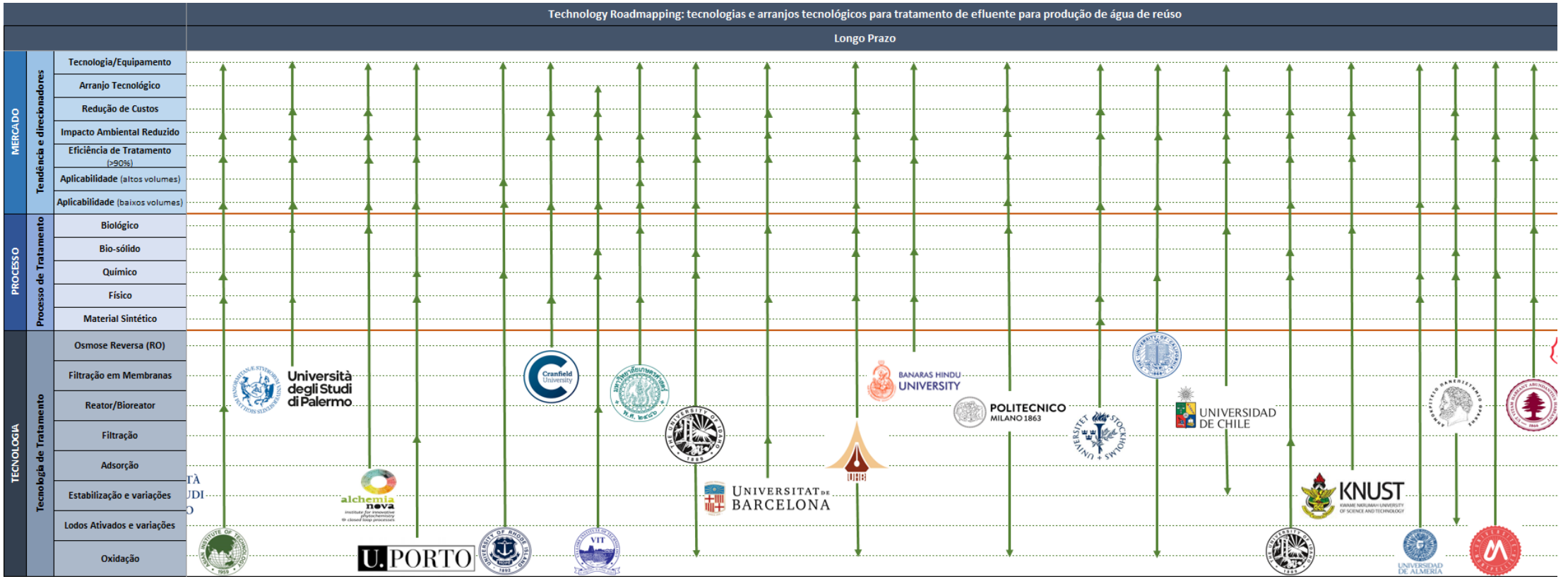
Como o *roadmap* a longo prazo é composto por artigos, ou seja, tecnologias e métodos ainda em estudo, diversos destes foram alocados em “baixos volumes” devido a escala de testes. Muitos ainda em escala de bancada. Aos que não houve menções diretas sobre a aplicabilidade, ficaram sem indicações do mapa. Também foi possível notar o avanço em termos de preocupação com o impacto ambiental, assunto mais explicito nos artigos encontrados. Por ainda estarem em fases de pesquisa e desenvolvimento, houve uma menor recorrência em termos de redução de custos.

Figura 36 – *Technology Roadmapping*: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Longo Prazo (a)



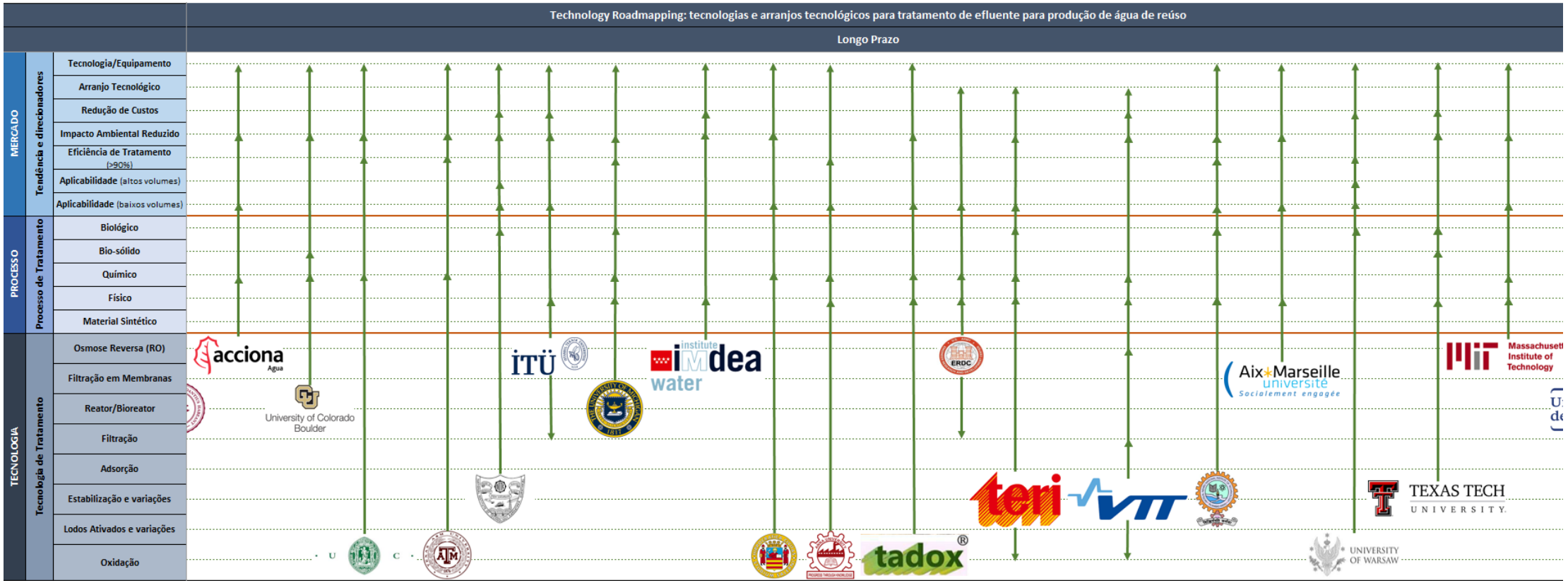
Fonte: Autora, 2024.

Figura 37 – *Technology Roadmapping:* tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Longo Prazo (b)



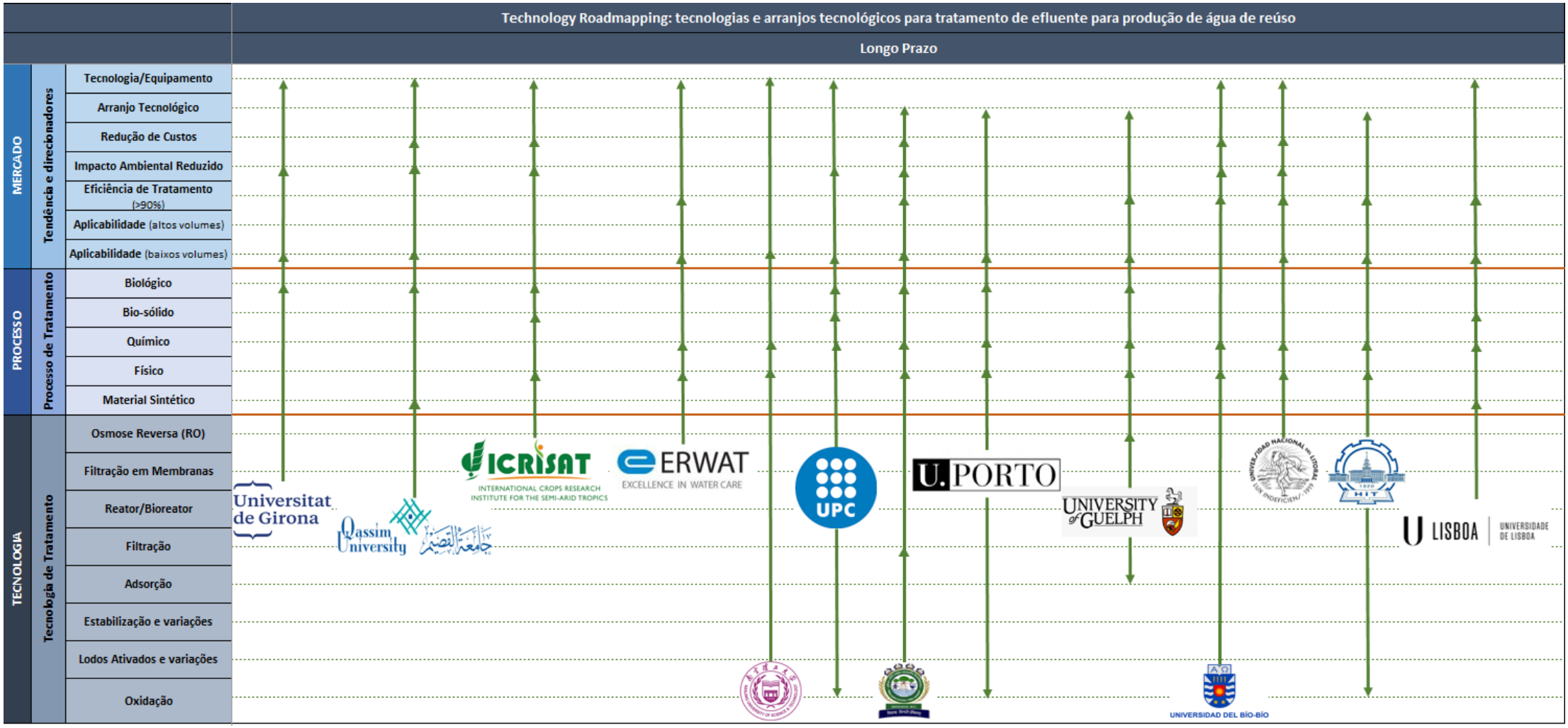
Fonte: Autora, 2024.

Figura 38 – *Technology Roadmapping*: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Longo Prazo (c)



Fonte: Autora, 2024.

Figura 39 – *Technology Roadmapping*: tecnologias e arranjos tecnológicos de tratamento de efluente para produção de água de reuso: Longo Prazo (d)



Fonte: Autora, 2024.

4.4. Caso de um município de pequeno porte

Terra que anteriormente pertencia a Cantagalo-RJ, o munícipio de Carmo-RJ foi emancipado em 1883 e em 1889 recebeu a categoria de cidade. Depois de 1922, quando a usina hidrelétrica da Ilha do Pombos iniciou suas construções no Rio Paraíba do Sul, a cidade começou a crescer. Na década de 30, afetada pela decadência da economia cafeeira, a cidade passou por períodos de crescimento lento. Mais recente, a implantação de pequenas indústrias e pequenos produtores agrícolas e agropecuários estimulou crescimento de mais bairros (Prefeitura Municipal de Carmo, 2022).

O município de Carmo-RJ pertence à Região Serrana do Rio de Janeiro, que compreende as cidades de Nova Friburgo, Petrópolis, Teresópolis e demais. Segundo as fontes do IBGE, o município tem uma área total de 305.749 km^2, que corresponde a 4.6% da área da Região Serrana. No censo de 2022, a população era de 17.198 pessoas (IBGE, 2022). A Tabela 14 apresenta uma compilação de dados referentes ao município.

Tabela 14 – Panorama geral no município de Carmo-RJ.

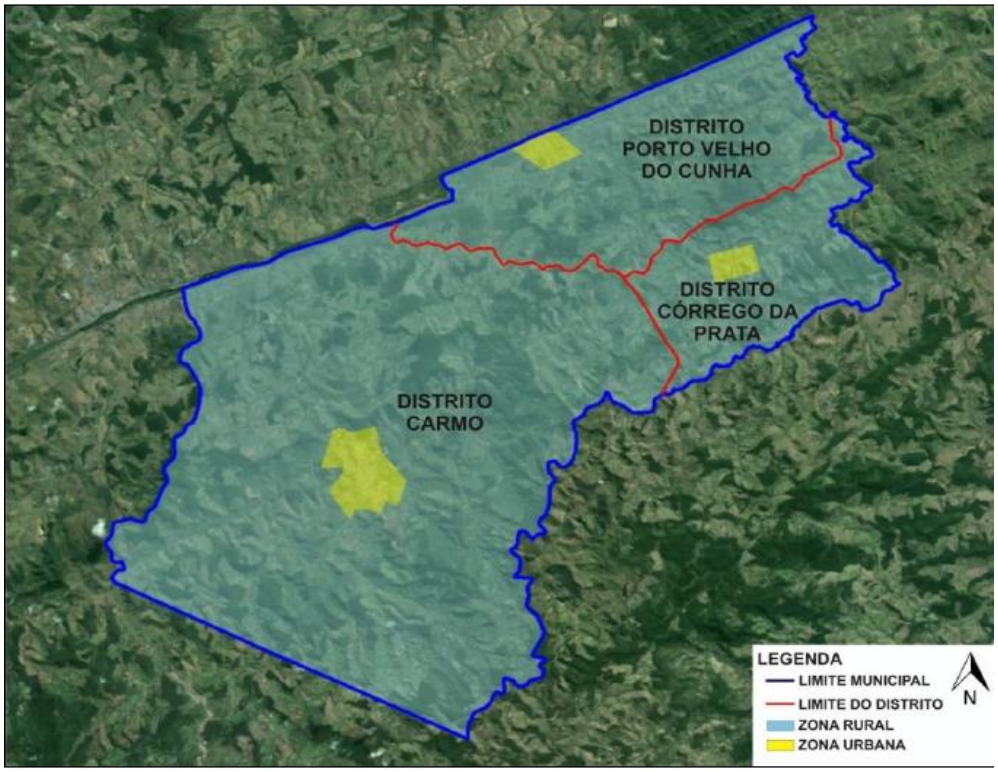
Área Territorial	**305.749 km^2**	**2022**
População residente	17.198 pessoas	2022
Densidade demográfica	56,25 hab/km^2	2022
Escolarização	98.6%	2010
IDHM (índice de desenvolvimento humano municipal)	0.696	2010
PIB per capita	R$ 29.286,22	2021
Esgotamento sanitário adequado	71%	2010

Fonte: Dados obtidos do IBGE, acesso 2024.

Segundo a Prefeitura Municipal de Carmo (2022) 72,3% da população vive na área urbana. Vale destacar que o município é constituído de três distritos (Figura 40): Carmo, a sede, em que se concentra a maior parte da população, Córrego da Prata e Porto Velho do Cunha. Também possui alguns bairros consideravelmente mais afastados do centro urbano, como Influência, Ilha dos

Pombos, Aurora, Santo Antônio do Quilombo, Barra de São Francisco, Bacelar e Paquequer.

Figura 40 – Distritos do Município de Carmo-RJ



Fonte: Secretaria do Estado do Ambiente, 2015.

Por conta da distância entre alguns bairros e distritos, o distrito de Carmo possui uma ETA (Estação de Tratamento de Água) central e algumas unidades de tratamento simples (pré-oxidação seguida de filtração, desinfecção e distribuição) que abastecem os outros dois distritos. Alguns bairros mais afastados são abastecidos por poços. A cidade possui rede pluvial e pouca extensão de rede de coleta de esgoto (não separadora), no entanto não é realizado o tratamento de esgoto sanitário. Existe na cidade de Carmo uma estrutura física de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), mas nunca foi dada partida na planta.

Carmo está situada na Bacia Hidrográfica Piabanha. O limite entre Carmo e Além Paraíba, município vizinho, é definido pelo Rio Paraíba do Sul. Os principais rios e córregos que cortam o município são: Rio Paraíba do Sul, Paquequer, Córrego Astréia, Córrego Vargem Linda, Córrego Recreio, Córrego da Prata, Córrego da Glória, Córrego das Flores e Ribeirão do Quilombo. Segundo o Plano

Municipal de Saneamento Básico de 2015, as principais fontes poluidoras do Rio Paraíba do Sul são, respectivamente, de origem industrial, doméstica e agropecuária.

Em relação ao consumo de água doce, áreas contendo mananciais são alvos de atenção específica. O município de Carmo já foi abastecido por meio de dois mananciais: Rio Batalha e Nascente Borges. Hoje a água captada é proveniente somente do Rio Batalha. Os distritos, como Córrego da Prata e Porto Velho do Cunha são abastecidos por poços, em que a água é tratada e distribuída à população.

De acordo com as informações da Prefeitura Municipal de Carmo, hoje a cidade não promove o tratamento de efluente, o que é um agravante em termos ambientais e de saúde pública, visto que o lançamento indiscriminado do esgoto aos corpos hídricos pode comprometer a qualidade dos mesmos. Não há nenhuma informação sobre o lançamento de efluentes urbanos no Rio Batalha.

Em relação a geomorfologia do município, o relevo é ondulado. No entanto, algumas ocupações (núcleos urbanos) se desenvolveram em terrenos mais planos que se encontram um pouco mais afastados da sede (Secretaria do Estado do Ambiente, 2015). O que dificulta um sistema de saneamento básico centralizado. Apesar disso, o relevo favorece a coleta de esgoto por gravidade e escoamento de águas pluviais.

O Termo de Compromisso nº 0418/2011 entre o município e a FUNASA (Fundação Nacional da Saúde) corresponde a uma das ações do município em termos de investimento em saneamento básico. O objetivo corresponde a execução de banheiros com sistema de fossa séptica e filtro para os domicílios da cidade. De acordo com o PMBS cerca de 76 moradias foram beneficiadas (Secretaria do Estado do Ambiente, 2015). Atualmente, não se sabe o número atualizado.

O município possui, na sede Carmo, cerca de 11 km de rede de coleta de esgoto, que corresponde a menos da metade da área urbana do distrito sede, Carmo. Em projeto com a FUNASA, em 2011 pretendia-se estender a rede, conforme apresentado na Figura 41. Além disso, a rede atual de coleta foi

construída em 2000, com diâmetros variando entre 150 e 300mm (Secretaria do Estado do Ambiente, 2015).

Figura 41 – Rede de esgotamento sanitário em Carmo-RJ

Fonte: Secretaria do Estado do Ambiente, 2015.

Atualmente, a cidade possui uma estação de tratamento de esgoto inacabada, faltando ainda as instalações hidráulicas e elétricas, e conexão com a rede coletora. Sem tratamento, a cidade lança o esgoto em três pontos distintos nos córregos do Emboque e Astréia. Isso é motivo de preocupação, visto que além do lançamento indiscriminado, esses córregos são contribuintes do Rio Paquequer, afluente do Rio Paraíba do Sul.

A estação de tratamento de esgoto construída teria capacidade para atender a 4000 habitantes. É uma estação de lodos ativados de aeração prolongada, e secagem de lodo em leitos de secagem. Seu projeto conta com: elevatória de esgoto, grades manuais, calha parshall, 2 tanques de aeração por ar difuso, 2 decantadores secundários e 10 unidades de leitos de secagem (Secretaria do Estado do Ambiente, 2015).

Tratando-se das localidades mais afastadas, o bairro Influência lança o efluente urbano, sem rede separadora, de forma difusa no Rio Paraíba do Sul, assim como a Barra de São Francisco, outro bairro, lançado no Rio Paquequer. Quanto à área rural, a maioria lança seu esgoto diretamente em rios e valas próximos às residências.

No distrito do Córrego da Prata e Porto Velho do Cunha praticamente não há sistema de esgotamento sanitário, sendo o esgoto gerado lançado de forma difusa no Córrego da Prata e Rio Paraíba do Sul, respectivamente. Em projeto com a FUNASA foram construídos, em 2011, 7 banheiros com sistema de fossa séptica e filtro em Córrego da Prata.

Em suma, até 2023 os serviços de esgotamento sanitário do município não são regularizados, a cobertura da rede coletora é pequena, não é realizado tratamento adequado para o esgoto coletado. A ETE existente nunca entrou em operação, a manutenção das redes é feita de forma corretiva e os lançamentos são feitos diretamente nos corpos hídricos do município.

De acordo com os resultados do *roadmap*, os *wetlands* construídos correspondem a tendência tecnológica para municípios como Carmo. Por possuir diversas áreas verdes, como campos e praças, com livre circulação de pessoas e animais, a reutilização de água é um aspecto possível e potencial no município.

Como apresentado, a cidade não possui tratamento de esgoto sanitário e além disso só possui 11km de rede coletora. Então, de fato, iniciar um projeto de reuso no município partindo do ponto zero pode transformar a cidade em um *case* de ETAR no Estado do Rio de Janeiro. A desvantagem é que a topografia do município não contribui, pois, apesar de ser um município pequeno, uma ETAR centralizada acarretaria um elevado custo energético para bombeamento com estações elevatórias de esgoto e estações elevatória de água de reuso.

Sendo assim, uma opção preliminar para estudo é descentralizar o tratamento em setores estratégicos do município. Seriam mais de uma *wetlands* posicionadas em áreas estratégicas que já possuem as áreas verdes e assim, a *wetlands* com tratamento avançado oxidativo além de contribuir com paisagismo local a água produzida seria aplicada às praças e áreas verdes públicas.

O abastecimento de Carmo, no distrito sede, que corresponde a maior área e concentração populacional do município é dividido em 12 DMCs (Distrito de Medição e Controle). A utilização do DMC garante o controle do sistema de abastecimento e setorização a fim de que as redes de abastecimento sejam controladas em tempo real, o que permite ação rápida para situações que afetem o abastecimento.

Tendo em vista as informações anteriores, aproveitando e agrupando alguns DMCs do município, a Figura 42 representa uma proposta preliminar para a coleta do efluente sanitário de maneira que a topografia local seja um auxiliar no projeto. Em todas as localidades setorizadas existem áreas verdes e paisagismos que favorecendo a aplicação da água de reuso para tal.

Figura 42 - Setorização do município de Carmo

Fonte: Autora, 2023

Além disso, o avanço nos estudos e projetos de *wetlands* construídos para tratamento e aproveitamento de efluentes e de lodo gerado tem sido evidente. Conforme apresentado no tópico anterior (item 4.3.), as soluções com wetlands podem ser aplicados para promover o tratamento de efluentes em cidades de pequeno porte, distritos e bairros para até 15 mil habitantes, sendo, portanto, uma ótima solução para o município em questão.

A seleção de uma ETE deve levar em conta diversos aspectos de projeto e econômico, e ter como foco a simplicidade operacional associado a sustentabilidade ambiental e redução de custos. Neste foco, as *wetlands* verticais, horizontais ou híbridas tem avançado.

Um dos problemas enfrentados de modo geral quando se trata de esgoto sanitário são os choques de carga e vazão e as rotinas de gestão de lodo. Com tecnologias avançadas a médio e longo prazo, já é possível perceber uma tendência em se obter eficiências acima de 90% para remoção de carga orgânica, e SST. E valores bem próximos para os demais componentes.

Em relação ao lodo, a tecnologia caminha a passos de tornar-se independente dos processos desaguamento e destinação do lodo gerado. Em suma, os benefícios reúnem os pontos focais desta dissertação: produzir uma água que alcance os padrões restritivos de reuso (ao ponto de não ser necessário a associação com processos oxidativos avançados), alinhar os conceitos de economia circular e os ODSs, e contribuir com qualidade ambiental oferecendo a integração paisagística.

CONCLUSÃO

Os diversos avanços sociais, como crescimento populacional, industrial e as mudanças climáticas tornam evidentes o aumento da demanda de um recurso com disponibilidade limitada: fontes de água potável. Em um cenário mundial, a escassez hídrica está cada vez mais presente. Desta forma, faz-se necessário evidenciar e investir em avanços a nível de inovações a fim de garantir soluções sustentáveis e mais eficientes destes recursos.

A evolução dos conhecimentos tanto técnicos quanto científicos a respeito dos ganhos adquiridos ao aplicar a água reciclada em um contexto de reuso não potável (ou até mesmo potável, a depender dos níveis de padrões de qualidade alcançados) são evidentes. Embora haja ainda um atraso em abrangência global, para muitos países em condições hídricas mais restritas, a aplicação de águas reutilizáveis já é institucionalizada, como nos casos de Israel e China.

No Brasil, a cobertura de coleta e tratamento de esgoto ainda é bastante baixa e caminha a passos curtos. Além disso, parte do esgoto coletado ainda não recebe o tratamento adequado sendo muitas vezes lançados de forma indiscriminada nos corpos hídricos. Atualmente menos de 5% da água aplicada no país é reutilizada, mas ainda com riscos de contaminações no solo.

Com o levantamento dos documentos de tecnologias patenteadas, dos pedidos de patentes em avaliação e dos artigos científicos, foi possível realizar a aplicação e elaboração do *roadmap* a curto, médio e longo prazo. A construção dele contou, ainda, com as informações do estágio atual no Brasil a nível de tecnologias hoje praticadas. Também foi possível avaliar o contexto, em termos legais, dos padrões de qualidade de água de reuso no país.

Alcançados os objetivos, conclui-se que:

- ✓ Através da análise realizada a curto prazo, foi observado que não há uma mudança brusca em termos de tecnologias e arranjos aplicados, a não ser a tendência em compactação dos sistemas de tratamento em uma tecnologia única. Há a adição de processos terciários ou melhora dos processos secundários hoje praticados a

nível de eficiência, ocupando menores espaços físicos. Ainda se mantêm a utilização dos reatores com processos químicos e físicos, com foco na redução dos impactos ambientais.

- ✓ Para a alocação temporal a médio prazo, ocorreu similar ao período a curto prazo. Um foco ainda maior a redução dos impactos ambientais com processos que trazem vantagens sustentáveis. Em termos de tecnologias, a lagoas ou sistemas de estabilização e sistemas plantados foram bem evidentes. A grande recorrência dos processos de filtração foi por associação a outras tecnologias para polimento final do efluente. Há um destaque neste nível para processos biológicos.
- ✓ A análise a longo prazo difere bastante das análises a curto e médio prazo. As tecnologias disruptivas, como os tratamentos oxidativos avançados e processos por membranas associados aos demais tratamentos convencionais, são mais presentes. Apesar de serem processos conhecidos, os artigos destacaram que a qualidade obtida garante a possibilidade de reuso de acordo com seu país de publicação. O que não foi tão evidente a curto e médio prazo. Uma tendência interessante a nível de pesquisas futuras foi em relação ao investimento em processos que utilizem insumos sustentáveis para os processos químicos, físicos, biológicos e bio-sólidos.

Na busca por identificar os padrões de qualidade definidos pelos documentos legais do país, conforme visto, o reuso de água pode ser um termo genérico quanto aos padrões ou aplicação a que se destina. Então, a depender do objetivo do reuso, as exigências diferem. Há um avanço na regulamentação e publicações legais em todo mundo. No entanto, caso do Brasil, os estados que apresentam textos legais para a prática de reuso consideram padrões bastante diferentes para serem adotados. Alguns até mesmo impraticáveis com a relação socioeconômica do país.

Recomenda-se traçar um incentivo à prática do reuso de forma a buscar homogeneizações dos possíveis padrões de qualidade de acordo com a identificação das diferentes possibilidades de reuso de água. Principalmente pelo

fato de que a maioria das aplicações de reuso envolvem lançamento no solo, a legalização para a qualidade da água reutilizada precisar considerar essa dispersão de possíveis poluentes (tanto no solo quanto em águas subterrâneas). E também, estar alinhada com a realidade do esgotamento sanitário no Brasil. É imprescindível o ajuste dos padrões, por um órgão público federal, de forma que permitam que a prática seja eficaz e eficiente.

Em relação às tecnologias, é importante traçar e recomendar linhas futuras de pesquisas e estudos mais aprofundados na associação de opções avançadas para tratamentos de efluentes com a pegada cada vez mais sustentáveis, como:

- Investir nos insumos ecológicos, biodegradáveis e sustentáveis (biocarvão, algas e microalgas, cascas de arroz, reutilizar o lodo como aditivo, e etc.) a fim de que garanta eficiência o pós-tratamento do efluente.
- Buscar alternativas mais sustentáveis também para o lodo gerado no processo de tratamento com a promoção da prática de reutilização dos resíduos obtidos, por exemplo, como aditivos aos insumos de tratamento.
- Aprofundar nas pesquisas de remoção dos desreguladores endócrinos, visto o crescente avanço da indústria farmacêutica e medicamentos cada vez mais avançados e disponíveis no mercado. A presença de componentes específicos podem inativar o tratamento ao qual o esgoto sanitário será submetido além dos riscos associados tanto ao descarte do efluente tratado em corpos hídricos quanto ao reuso da água produzida.

REFERÊNCIAS

ABIOGÁS. Associação Brasileira do Biogás. *Potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto: perspectivas para a universalização sustentável dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil*. São Paulo/SP: ABiogás, 2021. p. 33

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16782*: Conservação de água em edificações: Requisitos, procedimentos e diretrizes. Rio de Janeiro, 2019a.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16783*: Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações. Rio de Janeiro, 2019b.

ALCANTARA, D. P. DE; MARTENS, M. L. Technology Roadmapping (TRM): a systematic review of the literature focusing on models. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 138, p. 127-138, 2019.

AMARAL, Amanda Fraga do. *Monitoramento e avaliação da eficiência de um reator piloto Bardenpho modificado-IFAS no tratamento de esgoto real: remoção de benzofenona e dietilftalato*. 2021. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

ANA. Agência Nacional de Águas. *Atlas Esgotos*: Despoluição de Bacias Hidrográficas, 2020. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília: ANA, 2020.

ANGELAKIS, AN.; ASANO, T.; BAHRI, A.; JIMENEZ, BE.; TCHOBANOGLOUS, G. Water Reuse: From Ancient to Modern Times and the Future*. Front. Environ. Sci*. 6:26. 2018.

ARANEDA, I.; TAPIA, N.F.; ALLENDE, K.L.; VARGAS, I.T. Constructed wetland-microbial fuel cells for sustainable greywater treatment. *Water (Switzerland).* ed. 7, v.10, n. 940, 2018.

BELLUCCI M.; MARAZZI, F.; NADDEO, L.S.; PIERGIACOMO, F.; BENEDUCE, L.; FICARA, E.; MEZZANOTTE, V. Disinfection and nutrient removal in laboratory-scale photobioreactors for wastewater tertiary treatment. J*ournal of Chemical Technology and Biotechnology*. ed. 4, v. 95, p. 959-966, 2020.

BORGES, E. A. M. A. *Dimensionamento e parametrização de serviços para implantação de estações de tratamento de esgotos para municípios de pequeno porte*. 2018. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. *Technology Roadmap:* Planejamento Estratégico para alinhar Mercado-Produto-Tecnologia. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 5 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

BRASIL. Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996. Regula direitos e obrigações relativos à propriedade industrial. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 15 mai. 1996.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 18 jul. 2000.

BRK Ambiental. Tecnologia Nereda: tratamento de esgotos sanitários com biomassa granular aeróbias, 2018. 7º Encontro Nacional das Águas. São Paulo*: 7º Encontro Nacional das Águas*. 2018.

BUCHELE, G. T.; TEZA, P.; DANDOLINI, G. A. Métodos, técnicas e ferramentas para inovação: brainstorming no contexto da inovação. *VII Seminário de Pesquisa Interdisciplinar*, p. 1–21, 2015.

BUDYCH-GORZNA, M.; JAROSZYNSKI, L.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. Improved energy balance at a municipal wastewater treatment plant through waste activated sludge low-temperature alkaline tretreatment*. Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 106366, 2021.

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, 2013.

CHAISAR, M.; GARG, S.K.; Selection of Sewage Treatment Technology using Analytic Hierarchy Process, *Materials Today: Proceedings*. 2021.

CHRISPIM, M.C.; SCHOLZ, M.; NOLASCO, M.A., Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, v. 72, n. 103033, 2021.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CNRH. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 9 mar. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas Brasileiras. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 30 nov. 2000.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 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. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 13 mai. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 503, de 14 de dezembro de 2021. Define critérios e procedimentos para o reúso em sistemas de fertirrigação de efluentes provenientes de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 25 dez. 2021.

CORZO B.; DE LA TORRE T.; SANS C.; FERRERO E.; MALFEITO J.J. Evaluation of draw solutions and commercially available forward osmosis membrane modules for wastewater reclamation at pilot scale. *Chemical Engineering Journal*. v. 326, p. 1-8, 2017.

DAÁS, Andressa Amorim. *Utilização do roadmap para verificar tendências relacionadas a minimização da incrustação de carbonato de cálcio em sistemas de produção e exploração de óleo e gás.* 2021. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

DAS, S.; SENGUPTA, S. Sustainable Removal of Antibiotic Drugs from Wastewater Using Different Adsorbents — a Concise Review. *Water Conservation Science and Engineering*, v. 8, n. 10, 2023.

DÍAZ, V.; ANTIÑOLO, L.; POYATOS, CAPILLA J.M.; ALMÉCIJA, M.C.; MUÑÍO, M.D.M.; MARTÍN-PASCUAL, J. Nutrient Removal and Membrane Performance of

an Algae Membrane Photobioreactor in Urban Wastewater Regeneration. *Membranes*. ed. 10, v. 12, n. 982, 2022.

DISTRITO FEDERAL. Resolução nº 005, de 09 de maio de 2022. Estabelecer diretrizes para implantação e gestão do aproveitamento da água da chuva ou clara e do reúso da água cinza ou residuária em edificações no Distrito Federal. *Diário Oficial do Distrito Federal*, Brasília, DF, 9 mai. 2022.

EL KIK, O.; ISSA, L.; KATURI, K.P.; SAIKALY P.E.; ALAMEDDINE, I.; EL-FADEL, M. *Coupling anaerobic fluidized membrane bioreactors with microbial electrolysis cells towards improved wastewater reuse and energy recovery.* Journal of Environmental Chemical Engineering. ed. 10, v. 9, n. 105974, 2021.

ESPACENET da União Europeia. Disponível em: <http://worldwide.espacenet.com>. Acesso em 16 jul. 2023.

ESTÉVEZ, S.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M.T., How decentralized treatment can contribute to the symbiosis between environmental protection and resource recovery. *Science of the Total Environment,* v. 812, 2022.

GARCIA, D.; MUÑOZ MELÉNDEZ, G.; ARTEAGA, A.; OJEDA-REVAH, L.; MLADENOV, N. Greening Urban Areas with Decentralized Wastewater Treatment and Reuse: A Case Study of Ecoparque in Tijuana, Mexico. *Water*. v. 14, p. 596, 2022.

GE, H.; BATSTONE, D.J.; MOUICHS, M.; HU, S.; KELLER, J. Nutrient removal and energy recovery from high-rate activated sludge processes – impact of sludge age. *Bioresour. Technol*., v. 245, p. 1155-1161, 2017.

GHAFOORI, S.; HASSANPOUR DARVISHI, H.; MOHAMADVALI SAMANI, H.; TAHEREI GHAZVINEI, P. Enhancing the Method of Decentralized Multi-Purpose Reuse of Wastewater in Urban Area. *Sustainability*, v. 13, n. 24, 2021.

HAGOS, K.; ZONG, J.; LI, D.; LIU, Ch.; LU, X. Anaerobic co-digestion process for biogas production: progress, challenges and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev*., v. 76, p. 1485-1496, 2017.

IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/carmo.html> Acesso em 21 set. 2022.

INTERÁGUAS. Programa De Desenvolvimento Do Setor Águas. Elaboração de proposta de plano de ações para instituir uma política de reuso de efluente sanitário tratado no Brasil. Produto VI – Plano de Ações/Política de reuso (RF). Brasília, 2018.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos.* 6 ed. Rio de Janeiro: Fundo Editorial ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011.

KARBASSIYAZDI, E.; ALTAEE, A.; RAZMJOU, A.; SAMAL, A. K.; KHABBAZ, H. Gravity-driven composite cellulose acetate/activated carbon aluminium-based

hydrogel membrane for landfill wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 200, p. 682-692, 2023.

KERR, C.; PHAAL, R. Technology roadmapping: industrial roots, forgotten history and unknown origins. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 155, 2020.

KHAN, W.; NAM, J.-Y.; WOO, H.; RYU, H.; KIM, S.; MAENG, S.K.; KIM, H.-C. A proof of concept study for wastewater reuse using bioelectrochemical processes combined with complementary post-treatment technologies. *Environmental Science: Water Research and Technology.* Ed. 8, v. 8, p. 1489-1498, 2019.

KOOIJMAN, G.; KREUK, M.K. DE; NAN LIER, J.B. Influence of chemically enhanced primary treatment on anaerobic digestion and dewaterability of waste sludge. *Waste Sci. Technol*., v. 76, p. 1629-1639, 2017.

LEITE, M. S. R.; GASPAROTTO, A. M. S., Análise SWOT e suas funcionalidades: o autoconhecimento da empresa e sua importância. *Revista Interface Tecnológica*, v. 15, n.15, 2018.

LOBO, F.L.; WANG, H.; HUGGINS, T.; ROSENBLUM, J.; LINDEN, K.G.; REN, Z.J. Low-energy hydraulic fracturing wastewater treatment via AC powered electrocoagulation with biochar. *Journal of Hazardous Materials*. v. 309, p. 180-184. 2016.

MANGALGIRI, K.; CHENG, Z.; CERVANTES, S.; SPENCER, S.; LIU, H. UV-based advanced oxidation of dissolved organic matter in reverse osmosis concentrate from a potable water reuse facility: A Parallel-Factor (PARAFAC) analysis approach. *Water Research.* v. 204, n. 117585, 2021.

MARIN, P.; TAL, S.; YERES, J.; RINGSKOG, K. Water Management in Israel: Key Innovations and Lessons Learned for Water Scarce Countries. Washington, DC: *World Bank,* 2017.

MATIN, A.; BAIG, N.; ANAND, D.; AHMAD, I.; SAJID, M.; NAWAZ, M. S. Thin-film nanocomposite membranes for efficient removal of emerging pharmaceutical organic contaminants from water. *Enviromental Research*, v. 237, n. 116905, 2023.

MBBR BRASIL. Disponível em: <http://www.mbbrBrasil.com>. Acesso em 20 jan. 2024.

MONTEIRO, Lívia Gomes. *Technology roadmap: Nanomateriais aplicados ao tratamento terciário de águas resíduais industriais contaminadas por corantes orgânicos sintéticos*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

OLIVEIRA, M. G. DE; FREITAS, J. S.; FLEURY, A. L.; ROZENFELD, H.; PHAAL, R.; PROBERT, D. Roadmapping: uma abordagem estratégica para o gerenciamento da inovação em produtos, serviços e tecnologias.[S.l.: s.n.], 2012. 208p.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte I – análise de desempenho. *Engenharia Sanitária e Ambiental,* v. 10, n. 4. p. 347-357, 2005.

ONCHOKE, K. K.; FRANCLEMONT, C. M. Evaluation and removal efficiencies of a rural WWTP for metals and anions in Lufkin, East Texas (USA). *Environmental Monitoring and Assessment,* v. 194, n. 920, 2022.

PAQUES. BIOPAQ®UBOX: *Tratamento de Esgoto Doméstico*. Disponível em: <https://br.paques.nl/produtos/featured/biopaq-br/biopaqubox-tratamento-de-esgoto-domestico>. Acesso em 16 dez. 2023.

PARK, H.; PHAAL, R.; HO, J. Y.; O'SULLIVAN, E. Twenty Years of tchnology and strategic roadmapping research: A school of throught perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 154, 2020.

PHAAL, R. *Public-Domain Roadmaps.* [S.l.]: University of Cambridge, 2011.

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

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R., Visualising strategy: a classification of grafical roadmap forms. *International Journal of Technology Management*, v. 47, n. 4, p. 286-305, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CARMO. Disponível em: <https://www.carmo.rj.gov.br> Acesso em 18 set. 2023.

RIO DE JANEIRO. Decreto nº 47.403 de 15 de dezembro de 2020. Dispõe sobre a política de reúso de água para fins não potáveis no âmbito do Estado do Rio de Janeiro. *Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, RJ, 16 dez. 2020b.

RIO DE JANEIRO. Lei nº 9.043 de 02 de outubro de 2020. Cria o programa estadual de reuso de efluentes das estações de tratamento de esgoto – ETE'S –, para fins industriais, estabelece incentivos para sua implementação e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, RJ, 2 out. 2020a.

RUSTEN, B. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*, [s.l.], v. 34, n. 3, p.322-331, 2006.

SANTOS, A. S. P.; LIMA, M. A. M. Nota Técnica 2 - Aspectos legais relacionados ao reuso de águas como diretriz de institucionalização da prática no Brasil. *RESA*, v. 2, n. 3, p. 15-27, 2022.

SCOPUS (Elsevier). Disponível em: <https://www.scopus.com/>. Acesso em 10 out. 2022.

SECRETARIA DO ESTADO DO AMBIENTE. *Plano Municipal de Saneamento Básico de Carmo:* Relatório síntese. Contrato nº 020/2013 do processo E-07/000.491/2012, Rio de Janeiro, 2015.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. *Painel de informações sobre saneamento no Brasil*, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel>. Acesso em 10 jul. 2024.

SNSA. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Diagnóstico Temático*: Serviços de Água e Esgoto, 2023. Brasília/DF: Ministério das Cidades, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>. Acesso em 10 jul. 2024.

TAHERPOOR, P.; FARZAD, F.; ZABOLI, A. Performance evaluation and efficiency of functionalized cellulose nanocomposites for the removal of pharmaceutical contaminants from the aqueous environment*. Journal of Molecular Liquids*, v. 392, n. 123414, 2023.

TASLAKYAN, L.; BAKER, M.C.; STRAWN, D.G.; MÖLLER, G. Biochar-integrated reactive filtration of wastewater for P removal and recovery, micropollutant catalytic oxidation, and negative CO_2 e: Life cycle assessment and techno-economic analysis*. Water Environment Research*. ed. 12, v. 95, n. 10962, 2023.

TAUBER, J.; RAMSBACHER, A.; SVARDAL, K.; KRAMPE, J. Energetic potential for biological methanation in anaerobic sewage sludge digesters in Austria. *Energies*, v. 14, n. 6618, 2021.

NAÇÕES UNIDAS - UN. *64/292. The human right to water and sanitation*. Resolução adotada pela Assembleia Geral em 28 de julho de 2010. *Nações Unidas*, A/Res/94/292. 2010.

NAÇÕES UNIDAS - UN. *70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Resolução adotada pela Assembleia Geral em 25 de setembro de 2015. *Nações Unidas,* A/Res/70/2015. 2015.

UNESCO. UN-Water. *O valor da água:* fatos e dados. [S.l.]: UNESCO, 2021. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por>. Acesso em 11 dez. 2023.

VON SPERLING, Marcos. *Introdução à qualidade das águas residuárias e tratamento de esgotos*. 4 ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2014.

WATER EUROPE. *A water smart society for a successful post COVID19 recovery plan*. Bruxelas: WE, 2020. Disponível em: <https://watereurope.eu/wp-content/uploads/2020/04/A-Water-Smart-Society-for-a-post-covid19-recovery-plan.pdf>. Acesso em 13 out. 2023.

WEB OF SCIENCE. Disponível em: <https://www-webofscience-com.ez83.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/basic-search>. Acesso em 14 out. 2022.

WIPO Patentscope. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/pt/search.jsf>. Acesso em 08 ago. 2023.

XYLEM WATER SOLUTIONS. *Sanitaire ICEAS™ Advanced SBR*. Disponível em: <http://www.xylem.com/en-us>. Acesso em 17 jan. 2024.

APÊNDICE A – Patentes concedidas utilizadas na prospecção tecnológica

Tabela 15 – Listagem de patentes concedidas utilizadas como referência na prospecção a curto prazo (continua)

TÍTULO	ANO	NÚMERO	REQUERENTE(S)	PAÍS
Advanced treatment magnetic resin for recycling sewage landscape containing two quaternary ammonium sites and capable of synchronously removing nitrogen and phosphorus and preparation method of advanced treatment magnetic resin	2022	CN114797801	HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY	CHINA
Flocculating agent and preparation method thereof	2021	CN112358022	ZHEJIANG JIUHUAN ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Municipal sewage treatment process for recycling organic matters and phosphorus	2020	CN112079532	SUZHOU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY	CHINA
Integrated hydrodynamic reuse treatment equipment for wastewater	2019	CN110156204	KUNMING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY	CHINA
Method for BAME treatment and recycling of printing and dyeing wastewater	2018	CN108751573	ZHEJIANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	CHINA
Device and method for deep denitrification of domestic sewage through combination of intermittent-aeration-mode simultaneous nitrification and denitrification with short-range denitrification-anaerobic ammonium oxidation	2018	CN109019862	BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	CHINA

Two-stage recycling system for completely recycling carbon, nitrogen and phosphorus in municipal sewage	2021	CN112499886 (A); CN112499886 (B)	UNIV HOHAI	CHINA
Recycling treatment method for urban domestic sewage	2017	CN107055971 (A); CN107055971 (B)	ZHANG BAOSHUANG	CHINA
Hybridized water treatment agent prepared through blending and polymerizing titanium and polysaccharides and preparation technology therefor	2016	CN105217764 (A); CN105217764 (B)	UNIV JINAN	CHINA
Double set-alternative anaerobic/anoxic-aerobic membrane biological denitrification and dephosphorization technology and device	2015	CN104528935 (A); CN104528935 (B)	UNIV CHINA MINING	CHINA
Processing method of reverse osmosis concentrate during urban sewage reuse process	2014	CN104230076 (A); CN104230076 (B)	CHINA PETROLEUM & CHEMICAL BEIJING RES INST CHEM IND	CHINA
Anaerobic ammonia oxidation-based low-carbon nitrogen ratio urban sewage denitrification system and treatment process	2014	CN104058555 (A); CN104058555 (B)	NORTH CHINA MUNICIPAL ENGINEERING DESIGN & RES INST CO LTD	CHINA
Active coke modifying method and application method for removing heavy metal in recycled water by using modified active coke	2014	CN103894151 (A); CN103894151 (B)	UNIV BEIJING CIVIL ENGINEERING & ARCHITECTURE	CHINA
Method for regenerating urban sewage based on granular sludge	2013	CN103145294 (A); CN103145294 (B)	UNIV BEIJING TECHNOLOGY	CHINA
Method for printing and dyeing wastewater deep treatment by chemically enhancing MBR (membrane bioreactor) depth	2013	CN102863124 (A); CN102863124 (B)	UNIV JIANGNAN	CHINA

Fonte: Autora, 2024.

APÊNDICE B – Patentes solicitadas utilizadas na prospecção tecnológica

Tabela 16 – Listagem de patentes solicitadas utilizadas como referência na prospecção a médio prazo (continua)

TÍTULO	ANO	NÚMERO	REQUERENTE(S)	PAÍS
Urban sewage reuse deep purification treatment device	2023	CN218561240	JIANGSU ORIGIN WATER ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Preparation method and application for upgrading and converting municipal sludge into high-performance monatomic catalyst	2023	CN115920964	UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA	CHINA
Method and device for intensifying deep denitrification of integrated SPNAD system by adding sludge fermentation mixture in stages	2023	CN115611408	BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	CHINA
Device and method for treating low-carbon-nitrogen-ratio urban domestic sewage by coupling primary sludge fermentation with short-cut denitrification and synchronous anaerobic ammonia oxidation	2023	CN116332352	BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	CHINA
Urban sewage filtration treatment device based on Internet of Things	2021	CN213950904	CHONGQING SMART CYCLE TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Urban self-cleaning sewage treatment equipment	2021	CN214457287	SHANDONG PRIO WATER TREATMENT TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA

Urban sewage treatment and recycling device	2021	CN214088026	INNER MONGOLIA HUANGANG ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Distributed sewage treatment method	2020	CN111087137	WUXI KAIDI ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Urban domestic sewage recycling system	2020	CN112079520	CHONGQING NATURE ENZE ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Advanced treatment method for urban sewage	2019	CN109111020	CHONGQING YUZHUO TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Comprehensive flower and bird market sewage treatment system	2019	CN208829506	CHONGQING LEBANG TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Integrated domestic sewage treatment equipment	2019	CN209098439	TIANJIN HUAQING HUANYU ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Integrated sewage treatment equipment	2019	CN208869447	GUANGZHOU RESOURCE ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
Reclaimed water recycling device based on advanced sewage treatment	2019	CN209161694	GUANGRAO KELIDA PETROCHEMICA TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
SAFO MBR villages and small towns sewage treatment system	2017	CN206337119	LIAONING URBAN CONSTRUCTION DESIGN INSTITUTE CORP., LTD.	CHINA
A20+MBR processing device	2017	CN107055787	YUNNAN AOYUAN ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA

Recycled-water treatment system and recycled-water treatment process	2017	CN107265795	GANSU JINQIAO WATER TECHNOLOGY (GROUP) LIMITED BY SHARE LTD.	CHINA
Urban sewage treatment device	2017	CN106892503	GUANGZHOU PUBANG LANDSCAPE ARCHITECTURE CO., LTD.; SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	CHINA
Integrated electrochemical forward osmosis reactor for removing new organic pollutants in sewage	2015	CN104495986	DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	CHINA
Mobile integrated sewage treatment device	2014	CN104058552	DALIAN RADLANT WATER DISPOSE TECHNOLOGY CO., LTD.	CHINA
A/O/E (anaerobic/aerobic/endogenous respiration) composite treatment system for domestic sewage	2013	CN103435230	Henan Kunyuan Ecological Environmental Protection Science & Technology Co., Ltd.	CHINA
Method for removing new pollutants in secondary effluent by activating persulfate with ferric iron reinforced pyrite	2023	CN116495867 (A)	HARBIN INST TECHNOLOGY	CHINA
Method for removing new pollutants in secondary effluent by using pyrite filter	2023	CN116462293 (A)	HARBIN INST TECHNOLOGY	CHINA
Method for treating circulating cooling water by electro-adsorption technology	2022	CN115432867 (A)	HANGZHOU KEMO WATER TREAT ENGINEERING CO LTD	CHINA
Applications method of pericarp coagulant and external carbon source for low-carbon-source sewage	2022	CN114804330 (A)	SHUIFA PLANNING & DESIGN CO LTD UNIV JINAN	CHINA

Process and device for strengthening urban sewage carbon capture and excess sludge reduction and resource utilization by combining sludge fermentation with PN/A technology	2022	CN114772724 (A)	UNIV BEIJING TECHNOLOGY	CHINA
Urban sewage processing technology	2021	CN112429821 (A)	GAO JIE	CHINA
Deep purification treatment equipment for recycling urban sewage	2021	CN212504261 (U)	INNER MONGOLIA KETAI LONGDA ENVIRONMENTAL PROTECTION TECH CO LTD	CHINA
Recovery system of composite powder carrier in HPB urban sewage treatment	2020	CN211999007 (U)	UNIV TONGJI HUNAN SANYOU ENVIRONMENTAL TECH CO LTD	CHINA
Domestic sewage treatment and recycling integrated technology	2020	CN111794309 (A)	JINCHANG ZHONGCHENG TECH CO LTD ANHUI ZHONGCHENG INFORMATION TECH CO LTD	CHINA
Smart home shower water treatment system based on Internet of Things technology	2020	CN111675440 (A)	YANG BINGQIN	CHINA
Urban sewage reuse deep purification treatment process and equipment	2020	CN111348765 (A)	INNER MONGOLIA KETAI LONGDA ENVIRONMENTAL PROTECTION TECH CO LTD	CHINA
Aquaculture recession bypass treatment and wetland ecological restoration circulating treatment system	2020	CN210030331 (U)	TIANJIN ACADEMY OF ENV SCIENCES	CHINA
Sewage treatment system based on biological and phase coupling aerobic FBC technology	2020	CN210030319 (U)	THUNIP HOLDINGS CO LTD	CHINA

Urban ecological complex system based on sunken reclaimed water system	2019	CN209702482 (U)	XINKAI WATER ENVIRONMENTAL INVEST CO LTD	CHINA
Composite efficient sewage treating agent based on waste plastics	2017	CN106745395 (A)	ZHENGZHOU BEIDOU COMMUNICATION TECH CO LTD	CHINA
Laminated graphene packing based biofilm sewage treating method	2017	CN106477734 (A)	SONG HUAN	CHINA
Preparation method and application of sludge-based activated charcoal	2015	CN104944570 (A)	UNIV GUANGZHOU	CHINA
Low-energy-consumption municipal wastewater recycling method	2014	CN103739070 (A)	UNIV JIANGNAN	CHINA
Buried sewage treatment method	2014	CN103693822 (A)	QINGDAO NING TAIXIN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY CO LTD	CHINA
Method for processing domestic sewage by using novel flocculation deodorant	2014	CN103523884 (A)	WANG SHULAN	CHINA
Unpowered domestic wastewater treatment system	2013	CN203159412 (U)	YANTAI ROHO ENVIRONMENTAL PROT AND ENERGY CO LTD	CHINA
Domestic sewage treatment technology	2013	CN103113007 (A)	SUZHOU ENV TECH ENVIRONMENTAL PROT ENGINEERING CO LTD	CHINA

Fonte: Autora, 2024.

APÊNDICE C – **Artigos científicos utilizados na prospecção tecnológica**

Tabela 17 – Listagem de artigos científicos publicados utilizados como referência na prospecção a longo prazo (continua)

TÍTULO	ANO	REVISTA	DOI	INSTITUIÇÃO	PAÍS
Iron–ozone catalytic oxidation reactive filtration of municipal wastewater at field pilot and full-scale with high-efficiency pollutant removal and potential negative CO2e with biochar	2023	Water Environment Research	10.1002/wer.10876	University of Idaho / Evergreen Water Solutions, LTD	EUA
Photovoltaic powered operational scale Membrane Capacitive Deionization (MCDI) desalination with energy recovery for treated domestic wastewater reuse	2023	Desalination	10.1016/j.desal.2023.116647	University of New South Wales / University of New South Wales / UNSW Centre for Transformational Environmental Technologies	Austrália
Constructed wetland technology for the treatment and reuse of urban household greywater under conditions of Africa's Sahel region	2023	Water Supply	10.2166/ws.2023.121	Université Joseph KI-ZERBO / Université de Fada N'Gourma / Office National de l'Eau et de l'Assainissement	África
Fixed bed column experiments using cotton gin waste and walnut shells-derived biochar as low-cost solutions to removing pharmaceuticals from aqueous solutions	2023	Chemosphere	10.1016/j.chemosphere.2023.138591	The Pennsylvania State University / USDA-Agricultural Research Service	EUA
Peroxymonosulfate/Solar process for urban	2023	Science of the Total	10.1016/j.scitoten	CIEMAT-PSA / CIESOL, Joint	Espanha

wastewater purification at a pilot plant scale: A techno-economic assessment		Environment	v.2023.163407	Centre of the University of Almería-CIEMAT	
Trading-off greenhouse gas emissions and 741/2020 European Union water reuse legislation: An experimental MBR study	2023	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2023.129794	Palermo University / Istanbul Technical University	Itália
Nanofiltration combined with ozone-based processes for the removal of antineoplastic drugs from wastewater effluents	2023	Journal of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2023.119314	University of Porto	Portugal
Pilot-scale evaluation of sulfite-activated ferrate for water reuse applications	2023	Water Research	10.1016/j.watres.2022.119400	The University of Rhode Island	EUA
Biochar integrated reactive filtration of wastewater for P removal and recovery, micropollutant catalytic oxidation, and negative CO2e: Process operation and mechanism	2023	Water Environment Research	10.1002/wer.10926	University of Idaho	EUA
Catalytic Ozonation Combined with Conventional Treatment Technologies for the Recycling of Automobile Service Station Wastewater	2023	Water (Switzerland)	10.3390/w15010171	University of Engineering and Technology / University of Management and Technology / University of Hafr Al Batin	Paquistão
3D printed polylactic acid (PLA) filters reinforced with polysaccharide nanofibers for metal ions capture and	2023	Chemical Engineering Journal	10.1016/j.cej.2022.141153	Stockholm University	Suécia

microplastics separation from water					
Biochar-integrated reactive filtration of wastewater for P removal and recovery, micropollutant catalytic oxidation, and negative CO2e: Life cycle assessment and techno-economic analysis	2023	Water Environment Research	10.1002/wer.1096 2	University of Idaho	EUA
Recycled clay bricks and palm kernel shell as constructed wetland substrate for wastewater treatment: An engineered closed circuit circular economy approach	2023	Environmental Technology and Innovation	10.1016/j.eti.2023.103324	Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST) / Akenten Appiah-Menka University of Skills Training and Entrepreneurial Development (AAMUSTED)	África
Demonstrating the feasibility of a novel solar photo-Fenton strategy for full-scale operationalization according to EU 2020/741 disinfection targets for water reuse	2023	Chemical Engineering Journal	10.1016/j.cej.2023.144935	Joint Centre University of Almería-CIEMAT / University of Almería / Rey Juan Carlos University	Espanha
Evaluation of Pilot Scale Domestic Wastewater Reuse System in Terms of Irrigation and Industrial Process Waters in Turkey	2023	Urban Water Journal	10.1080/1573062X.2021.1977966	Istanbul Technical University	Turquia
Greywater treatment for reuse: Effect of combined foam fractionation and	2023	Journal of Cleaner Production	10.1016/j.jclepro.2023.137792	University of Salerno	Itália

persulfate-iron based fenton process in the bacterial removal and degradation of organic matter and surfactants					
Integration of TADOX® technology to improve water reuse efficiency of constructed wetland-treated water	2023	Water Practice and Technology	10.2166/wpt.2023.114	The Energy and Resources Institute (TERI)	Índia
Advanced Biological Oxidation of Domestic Sewage with the Use of Compost Beds in a Natural Treatment System for Wastewater	2023	Sustainability (Switzerland)	10.3390/su151813555	Institute of Applied Ecology / University of Warsaw	Polônia
Low-cost ceramic filter bioreactor for treatment and reuse of residential septic tank effluent: A decentralized approach for small communities	2023	Environmental Technology and Innovation	10.1016/j.eti.2023.103213	Qassim University / Islamic University of Technology (IUT)	Arábia saudita
Application of nonwoven microfiltration membrane on activated sludge final effluent: improving wastewater quality for reuse	2023	International Journal of Environmental Science and Technology	10.1007/s13762-023-04876-y	Ekurhuleni Water Care Company	África do sul
Nutrient Removal and Membrane Performance of an Algae Membrane Photobioreactor in Urban Wastewater Regeneration	2022	Membranes	10.3390/membranes12100982	University of Granada	Espanha
Sulfite-activated ferrate for water reuse applications	2022	Water Research	10.1016/j.watres.2022.118317	University of Rhode Island	EUA

Photocatalytic activity of CuO nanoparticles for organic and inorganic pollutants removal in wastewater remediation	2022	Chemosphere	10.1016/j.chemosphere.2022.134623	Debre Berhan University	Etiópia
Ultrafiltration Membranes System: A Proposal to Remove Emerging Pollutants in Urban Wastewater	2022	Membranes	10.3390/membranes12121234	VECTORIS SL	Espanha
3D Natural Mesoporous Biosilica-Embedded Polysulfone Made Ultrafiltration Membranes for Application in Separation Technology	2022	Polymers	10.3390/polym14091750	CSIR-Central Salt and Marine Chemicals Research Institute	Índia
Design of an efficient, tunable and scalable freestanding flexible membrane for filter application	2022	RSC Advances	10.1039/d1ra07423g	Banaras Hindu University	Índia
Copper oxide/peroxydisulfate system for urban wastewater disinfection: Performances, reactive species, and antibiotic resistance genes removal	2022	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2021.150768	University of Montpellier	França
Validation of Recycled Nanofiltration and Anion-Exchange Membranes for the Treatment of Urban Wastewater for Crop Irrigation	2022	Membranes	10.3390/membranes12080746	IMDEA Water Institute	Espanha
Removal of persistent organic pollutants and disinfection of	2022	Water Science and Technology	10.2166/wst.2022.308	Anna University	Índia

pathogens from secondary treated municipal wastewater using advanced oxidation processes					
TERI Advanced Oxidation Technology (TADOX®) to treat industrial wastewater with integration at pre-and post-biological stage: case studies from India	2022	Water Practice and Technology	10.2166/wpt.2022.065	TADOX® Technology Centre for Water Reuse	Índia
Municipal Wastewater Treatment uses Vertical Flow Followed by Horizontal Flow in a Two-Stage Hybrid-Constructed Wetland Planted with Calibanus hookeri and Canna indica (Cannaceae)	2022	Water, Air, and Soil Pollution	10.1007/s11270-022-05984-0	Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad	Paraguai
Treating agricultural non-point source pollutants using periphyton biofilms and biomass volarization	2022	Journal of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2021.113869	International Crop Research Institute for Semi-arid Tropics (ICRISAT)	Índia
Self-cycled photo-Fenton-like system based on an artificial leaf with a solar-to-H2O2 conversion efficiency of 1.46%	2022	Nature Communications	10.1038/s41467-022-32410-0	Nanjing University of Science and Technology / Yonsei University	China
Effect of Fe(II)-Activated Peroxymonosulfate (PMS) on the Performance of Ultrafiltration (UF) Process for Secondary Effluent Treatment and Reuse	2022	Water (Switzerland)	10.3390/w14111726	Harbin Institute of Technology	China

The removal of selected inorganics from municipal membrane bioreactor wastewater using UF/NF/RO membranes for water reuse application: A pilot-scale study	2021	Membranes	10.3390/membranes11020117	Cape Peninsula University of Technology	África do sul
Pathogens removal in a sustainable and economic high-rate algal pond wastewater treatment system	2021	Sustainability (Switzerland)	10.3390/su132313232	National Research Centre	Egito
Thermophilic (55 °C) and hyper-thermophilic (70 °C) anaerobic digestion as novel treatment technologies for concentrated black water	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.125705	Wageningen University and Research / DeSaH B.V / LeAF B.V	Holanda
UV-based advanced oxidation of dissolved organic matter in reverse osmosis concentrate from a potable water reuse facility: A Parallel-Factor (PARAFAC) analysis approach	2021	Water Research	10.1016/j.watres.2021.117585	University of California	EUA
Performance of a micro-scale membrane reactor for greywater treatment at household level	2021	Membranes	10.3390/membranes11010063	Democritus University of Thrace / Act4energy P.C.	Grécia
Coupling anaerobic fluidized membrane bioreactors with microbial electrolysis cells towards improved wastewater reuse and energy recovery	2021	Journal of Environmental Chemical Engineering	10.1016/j.jece.2021.105974	American University of Beirut	Líbano

Recent progress using membrane aerated biofilm reactors for wastewater treatment	2021	Water Science and Technology	10.2166/wst.2021.443	University of Michigan	EUA
Wastewater purification with nutrient and carbon recovery in a mobile resource container	2021	Membranes	10.3390/membranes11120975	VTT Technical Research Centre of Finland	Finlândia
Ultrafiltration as tertiary treatment for municipal wastewater reuse	2021	Separation and Purification Technology	10.1016/j.seppur.2021.118921	Aix-Marseille Univ	França
2-D modeling to understand the design configuration and flow dynamics of Pond-In-Pond (PIP) wastewater treatment system for reuse	2021	Process Safety and Environmental Protection	10.1016/j.psep.2021.07.012	Texas Tech University	EUA
Treatment of greenhouse wastewater for reuse or disposal using monovalent selective electrodialysis	2021	Desalination	10.1016/j.desal.2021.115037	Massachusetts Institute of Technology	EUA
Zooplankton-based reactors for tertiary wastewater treatment: A pilot-scale case study	2021	Journal of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2020.111538	University of Girona	Espanha
Treatment of effluent of upflow anaerobic sludge blanket bioreactor for water reuse	2021	Water (Switzerland)	10.3390/w13152123	University of Guelph	Canadá
Silver nanoparticle filter for domestic wastewater reuse	2021	Journal of Chemical Technology and Biotechnology	10.1002/jctb.6710	Universidad Nacional del Litoral	Argentina
Evaluation of the influence of filter medium composition on treatment	2021	Journal of Environmental Management	10.1016/j.jenvman.2021.113646	Politecnico di Torino / Universidade de Lisboa	Itália

performances in an open-air green wall fed with greywater					
Suitability of SBR for wastewater treatment and reuse: Pilot-scale reactor operated in different anoxic conditions	2020	International Journal of Environmental Research and Public Health	10.3390/ijerph17051617	Imam Abdulrahman Bin Faisal University	Arábia saudita
Hydroxyl Radical Generation by Recyclable Photocatalytic Fe3O4/ZnO Nanoparticles for Water Disinfection	2020	Air, Soil and Water Research	10.1177/117862212097095 4	Universidad de las Américas Puebla	México
Microbial assisted phytodepuration for water reclamation: Environmental benefits and threats	2020	Chemosphere	10.1016/j.chemosphere.2019.124843	Università degli Studi di Milano	Itália
Ultrafiltration pretreatment enhances membrane distillation flux, resilience and permeate quality during water recovery from concentrated blackwater (urine/faeces)	2020	Separation and Purification Technology	10.1016/j.seppur.2020.117547	Cranfield University	Reino unido
Innovative multistage constructed wetland for municipal wastewater treatment and reuse for agriculture in Senegal	2020	Water (Switzerland)	10.3390/w12113139	University of Barcelona	Espanha
Disinfection and nutrient removal in laboratory-scale photobioreactors for wastewater tertiary treatment	2020	Journal of Chemical Technology and Biotechnology	10.1002/jctb.6010	Politecnico di Milano	Itália
A pilot study combining ultrafiltration with ozonation for the	2020	Water (Switzerland)	10.3390/w12123458	Universidade do Porto / Universidade Católica	Portugal

treatment of secondary urban wastewater: Organic micropollutants, microbial load and biological effects				Portuguesa	
First results: Innovative solar disinfection technology for treated wastewater that integrates materiality, geometry, and reflective panels	2020	International Journal of Environmental Research and Public Health	10.3390/ijerph17186523	University of Bío Bío	Chile
A proof of concept study for wastewater reuse using bioelectrochemical processes combined with complementary post-treatment technologies	2019	Environmental Science: Water Research and Technology	10.1039/c9ew00358d	Sejong University	EUA
Application of a novel, continuous-feeding ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system to disinfect domestic wastewater for discharge or agricultural reuse	2019	Water Research	10.1016/j.watres.2019.01.006	Asian Institute of Technology	Tailândia
Process performance and reuse potential of a decentralized wastewater treatment system	2019	Water Science and Technology	10.2166/wst.2020.046	Vellore Institute of Technology (VIT)	India
Removal of enteric pathogens from real wastewater using single and catalytic ozonation	2019	Water (Switzerland)	10.3390/w11010127	University of Coimbra	Portugal
Effectiveness of zinc oxide-assisted photocatalysis for concerned constituents in reclaimed	2019	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2018.08.360	Texas A&M University	EUA

wastewater: 1,4-Dioxane, trihalomethanes, antibiotics, antibiotic resistant bacteria (ARB), and antibiotic resistance genes (ARGs)					
Performance evaluation of horizontal and vertical flow constructed wetlands as tertiary treatment option for secondary effluents	2019	Applied Water Science	10.1007/s13201-019-1014-9	NITK Surathkal	India
Techno-economic evaluation and comparison of PAC-MBR and ozonation-UV revamping for organic micro-pollutants removal from urban reclaimed wastewater	2019	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2019.03.365	UPC-BarcelonaTECH / Water Technology Center CETaqua	Espanha
Constructed wetland-microbial fuel cells for sustainable greywater treatment	2018	Water (Switzerland)	10.3390/w10070940	Universidad de Chile	Chile
Application of horizontal flow constructed wetland and solar driven disinfection technologies for wastewater treatment in India	2018	Water Practice and Technology	10.2166/wpt.2018.029	Indira Gandhi National Tribal University	India
Evaluation of draw solutions and commercially available forward osmosis membrane modules for wastewater reclamation at pilot scale	2017	Chemical Engineering Journal	10.1016/j.cej.2017.05.108	Acciona Agua / University of Barcelona	Espanha

Novel vertical ecosystem for sustainable water treatment and reuse in tourist resorts	2016	International Journal of Sustainable Development and Planning	10.2495/SDP-V11-N3-263-274	Institute for Innovative Phytochemistry and Closed Loop Processes	Austria
Low-energy hydraulic fracturing wastewater treatment via AC powered electrocoagulation with biochar	2016	Journal of Hazardous Materials	10.1016/j.jhazmat.2016.02.020	University of Colorado Boulder	EUA
Gray water recycle: Effect of pretreatment technologies on low pressure reverse osmosis treatment	2016	Journal of Environmental Chemical Engineering	10.1016/j.jece.2016.09.031	U.S. Army Engineer Research and Development Center	EUA
Evaluation of treated sewage reuse potential and membrane-Based water reuse technology for the Bangkok metropolitan area	2015	Water Science and Technology	10.2166/wst.2015.420	Kasetsart University / Asian Institute of Technology / MRC Rensui Asia Pte. Ltd	Tailândia
Ambient iron-mediated aeration (IMA) for water reuse	2013	Water Research	10.1016/j.watres.2012.11.005	University of Miami / Montclair State University / Zima Group International	EUA
Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system	2013	Journal of King Saud University - Engineering Sciences	10.1016/j.jksues.2012.05.003	Northern Border University	Arábia saudita

Fonte: Autora, 2024.

APÊNDICE D – Logomarcas utilizadas no *roadmap*

Requerente(S) / Instituição	Logomarca
Harbin Institute Of Technology	
Zhejiang Jiuhuan Environmental Technology Co., Ltd.	
Suzhou University Of Science And Technology	
Kunming University Of Science And Technology	
Zhejiang University Of Technology	
Beijing University Of Technology	
Univ Hohai	

Zhang Baoshuang	Zhang Baoshuang
Univ Jinan	
Univ China Mining	
China Petroleum & Chemical Beijing Res Inst Chem Ind	
North China Municipal Engineering Design & Res Inst Co Ltd	
Univ Beijing Civil Engineering & Architecture	
Univ Jiangnan	
Jiangsu Origin Water Environmental Technology Co., Ltd.	Jiangsu Origin Water

University Of Science And Technology Of China	
Chongqing Smart Cycle Technology Co., Ltd.	Chongqing Smart Cycle
Shandong Prio Water Treatment Technology Co., Ltd.	Shandong Prio Water Treatment
Inner Mongolia Huangang Environmental Protection Technology Co., Ltd.	Inner Mongolia Huangang
Wuxi Kaidi Environmental Protection Technology Co., Ltd.	Wuxi Kaidi Environmental
Chongqing Nature Enze Environmental Protection Technology Co., Ltd.	Chongqing Nature Enze
Chongqing Yuzhuo Technology Co., Ltd.	Chongqing Yuzhuo Technology
Chongqing Lebang Technology Co., Ltd.	Chongqing Lebang Technology
Tianjin Huaqing Huanyu Environmental Protection Technology Co., Ltd.	Tianjin Huaqing Huanyu
Guangzhou Resource Environmental Protection Technology Co., Ltd.	Guangzhou Resource
Guangrao Kelida Petrochemical Technology Co., Ltd.	Guangrao Kelida Petrochemical
Liaoning Urban Construction Design Institute Corp., Ltd.	Liaoning Urban Construction Design
Yunnan Aoyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd.	Yunnan Aoyuan Environmental

Gansu Jinqiao Water Technology (Group) Limited By Share Ltd.	Gansu Jinqiao Water Technology
Guangzhou Pubang Landscape Architecture Co., Ltd.; South China University Of Technology	
Dalian University Of Technology	
Dalian Radiant Water Dispose Technology Co., Ltd.	Dalian Radiant Water
Henan Kunyuan Ecological Environmental Protection Science & Technology Co., Ltd.	Henan Kunyuan Ecological
Hangzhou Kemo Water Treat Engineering Co Ltd	Hangzhou Kemo Water Treat Engineering
Gao Jie	Gao Jie
Inner Mongolia Ketai Longda Environmental Protection Tech Co Ltd	Inner Mongolia Ketai Longda
Univ Tongji Hunan Sanyou Environmental Tech Co Ltd	
Jinchang Zhongcheng Tech Co Ltd Anhui Zhongcheng Information Tech Co Ltd	ZJIECN 中杰科技
Yang Bingqin	Yang Bingqin

Tianjin Academy Of Env Sciences	
Thunip Holdings Co Ltd	
Xinkai Water Environmental Invest Co Ltd	
Zhengzhou Beidou Communication Tech Co Ltd	
Song Huan	
Univ Guangzhou	
Qingdao Ning Taixin Environmental Science And Technology Co Ltd	
Wang Shulan	
Yantai Roho Environmental Prot And Energy Co Ltd	
Suzhou Env Tech Environmental Prot Engineering Co Ltd	
University of Idaho / Evergreen Water Solutions, LTD	

University of New South Wales / UNSW Centre for Transformational Environmental Technologies	
Université Joseph KI-ZERBO / Université de Fada N'Gourma / Office National de l'Eau et de l'Assainissement	
The Pennsylvania State University / USDA-Agricultural Research Service	
CIEMAT-PSA / CIESOL, Joint Centre of the University of Almería-CIEMAT	
Palermo University / Istanbul Technical University	
University of Porto	
The University of Rhode Island	
University of Engineering and Technology / University of Management and Technology / University of Hafr Al Batin	

Stockholm University	
Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST) / Akenten Appiah-Menka University of Skills Training and Entrepreneurial Development (AAMUSTED)	
Joint Centre University of Almería-CIEMAT / University of Almería / Rey Juan Carlos University	
Istanbul Technical University	
University of Salerno	
The Energy and Resources Institute (TERI)	
Institute of Applied Ecology / University of Warsaw	
Qassim University / Islamic University of Technology (IUT)	
Ekurhuleni Water Care Company	

University of Granada	UNIVERSIDAD DE GRANADA
Debre Berhan University	
VECTORIS SL	vectoris Innovación y servicios integrales
CSIR-Central Salt and Marine Chemicals Research Institute	
Banaras Hindu University	BANARAS HINDU UNIVERSITY
University of Montpellier	
IMDEA Water Institute	institute IMDEA water
Anna University	ANNA UNIVERSITY PROGRESS THROUGH KNOWLEDGE
TADOX® Technology Centre for Water Reuse	tadox®

Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad	
International Crop Research Institute for Semi-arid Tropics (ICRISAT)	
Nanjing University of Science and Technology / Yonsei University	
Cape Peninsula University of Technology	
National Research Centre	
Wageningen University and Research / DeSaH B.V / LeAF B.V	
University of California	
Democritus University of Thrace / Act4energy P.C.	

American University of Beirut	
University of Michigan	
VTT Technical Research Centre of Finland	
Aix-Marseille Univ	
Texas Tech University	
Massachusetts Institute of Technology	
University of Girona	
University of Guelph	
Universidad Nacional del Litoral	
Politecnico di Torino / Universidade de Lisboa	

Imam Abdulrahman Bin Faisal University	جامعة الإمام عبد الرحمن بن فيصل IMAM ABDULRAHMAN BIN FAISAL UNIVERSITY
Universidad de las Américas Puebla	UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS PUEBLA UDLAP
Università degli Studi di Milano	UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
Cranfield University	Cranfield University
University of Barcelona	UNIVERSITAT DE BARCELONA
Politecnico di Milano	POLITECNICO MILANO 1863
University of Bío Bío	UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
Sejong University	SEJONG UNIVERSITAS AGAPE 1940 CREATIVITAS SERVITIUM

Asian Institute of Technology	
Vellore Institute of Technology (VIT)	
University of Coimbra	
Texas A&M University	
NITK Surathkal	
UPC-BarcelonaTECH / Water Technology Center CETaqua	
Universidad de Chile	
Indira Gandhi National Tribal University	

Acciona Agua / University of Barcelona	acciona Agua
Institute for Innovative Phytochemistry and Closed Loop Processes	alchemia nova institute for innovative phytochemistry closed loop processes
University of Colorado Boulder	University of Colorado Boulder
U.S. Army Engineer Research and Development Center	U.S. ARMY ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER ERDC
Kasetsart University / Asian Institute of Technology / MRC Rensui Asia Pte. Ltd	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. ๒๔๘๖
University of Miami / Montclair State University / Zima Group International	UNIVERSITY OF MIAMI
Northern Border University	2007 - ١٤٢٨ جامعة الحدود الشمالية NORTHERN BORDER UNIVERSITY