

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Beatriz Melo Marques

**NITRIFICAÇÃO EM REATOR DO TIPO MBBR: UMA REVISÃO
BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Maceió

2023

Beatriz Melo Marques

**NITRIFICAÇÃO EM REATOR DO TIPO MBBR: UMA REVISÃO
BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Professora Dra. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira

Coorientador: Professor Dr. Marcio Gomes Barboza

Maceió

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Divisão de Tratamento Técnico
Biblioteca Central

Bibliotecário: Jorge Raimundo da Silva – CRB-4 - 1528

M357t Marques, Beatriz Melo

Nitrificação em reator do tipo MBBR: uma revisão bibliométrica e sistemática da literatura. / Beatriz Melo Marques. – 2023.

64 f. : il., grafs., tabs.

Orientadora: Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira.

Coorientador: Márcio Gomes Barboza.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 55-64.

1. Tratamento de efluentes. 2. Reator MBBR. 3. Mídias biológicas.
4. Nitrificação - reatores MBBR - Análise bibliométria.
5. Nitrificação - reatores MBBR - Revisão sistemática. I. Título.

CDU: 351.777.61

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiro aos meus pais, Sônia e Fernando, e as minhas irmãs, Renata e Fernanda, por todo o apoio que deram quando tomei a decisão de estudar em outro estado, pelo amor e incentivo ao longo de todos esses anos foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Ao meu cunhado, Guilherme, por ter me dado aulas de matemática e física e por ter me ensinado a gostar desse mundo. Aos meus tios, Silvio e Carmélia, e meus primos, Camila e Pedro, sou grata por me receberem em sua casa e me acolherem com tanto carinho.

À minha orientadora, Professora Ivete, e meu coorientador, Professor Márcio, agradeço por sua orientação, paciência e conhecimento. Sua liderança e apoio foram essenciais para meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço também aos professores Daniele, Karina e Mariano pelas contribuições ao longo de processo.

Não posso deixar de expressar minha gratidão ao CAEAMB e à empresa júnior PROTEQ, grupos dos quais fiz parte durante a graduação. Os dois grupos me proporcionaram experiências e aprendizados tanto no âmbito acadêmico quanto no profissional e pessoal, que com certeza me fizeram uma pessoa melhor. Além disso, foram espaços nos quais pude conhecer e fazer amizades com pessoas incríveis que pretendo levar para vida. Agradeço especialmente a Mari, Marquinhos, Augusto e Elder que aguentaram meus surtos nos meses em que estive escrevendo este TCC.

Minha gratidão a todos vocês, obrigada por fazerem parte dessa fase fundamental da minha vida.

RESUMO

A necessidade de remoção de nutrientes de efluentes, em particular o nitrogênio, também se tornou uma questão relevante, uma vez que esse nutriente, quando em excesso, é responsável pela eutrofização dos corpos hídricos. O reator MBBR surgiu da necessidade de tratamentos mais compactos, devido à crescente demanda nos grandes centros urbanos. A tecnologia MBBR utiliza mídias biológicas, permitindo o crescimento aderido de microrganismos, formando biofilmes. A formação dos biofilmes em camadas sucessivas cria um ambiente propício para a remoção de nitrogênio por meio dos processos de nitrificação e desnitrificação. Este trabalho teve como objetivo realizar a revisão bibliométrica e sistemática da literatura sobre nitrificação em reatores MBBR, tratando efluentes domésticos, de forma a observar como as pesquisas têm abordado o tema ao longo do tempo. Para tanto, foram utilizados termos de busca na base de dados *Scopus*, tais como “*MBBR*”, “*Nitrification*” e “*Wastewater Treatment*”, com retorno de 243 trabalhos. Em seguida, foi realizado um refinamento excluindo termos relativos a tratamento de lixiviados de aterros sanitários e outros efluentes, e dessa forma retornaram 232 trabalhos, a partir dos quais foi realizada a análise bibliométrica. Os resultados indicaram a primeira publicação em 1993, e que há uma tendência ao crescimento de pesquisas sobre o tema até os dias atuais. Apesar da Noruega ter sido pioneira na pesquisa de reatores MBBR, a China é o país com o maior número de publicações e instituições que financiam as pesquisas. Ao longo do período de 1993 – 2023, Christensson, M. foi o autor que mais se destacou em número de publicações, grupos de pesquisadores de diferentes países publicaram em colaboração. Os principais eixos de pesquisa no horizonte temporal foram: adaptação dos sistemas convencionais de lodos ativados aos reatores MBBR, custos das mídias biológicas e buscas de materiais alternativos, desempenho dos reatores MBBR em baixas temperaturas, modelagem matemática do processo de nitrificação em reatores MBBR, estudo de biofilmes com vistas ao processo de nitrificação/desnitrificação simultâneas e diminuição de custos do processo com economia de energia.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes; Reator MBBR; Mídias biológicas

ABSTRACT

The need to remove nutrients from the effluents, particularly nitrogen, has also become a relevant issue, since this nutrient, when in excess, is responsible for the eutrophication of water bodies. The MBBR reactor arose from the need for more compact treatments, due to the growing demand in large urban centers. MBBR technology uses biological media, allowing the attached growth of microorganisms, forming biofilms. The formation of biofilms in successive layers creates an environment conducive to the removal of nitrogen through the processes of nitrification and denitrification. This work aimed to carry out a bibliometric and systematic review of the literature on nitrification in MBBR reactors, treating domestic effluents, in order to observe how research has approached the topic over time. To this end, search terms were used in the Scopus database, such as “MBBR”, “Nitrification” and “Wastewater Treatment”, returning 243 works. Then, a refinement was carried out excluding terms related to the treatment of leachate from landfills and other effluents, and in this way 232 works were returned, from which the bibliometric analysis was carried out. The results indicated the first publication in 1993, and that there is a tendency for research on the topic to grow to this day. Although Norway was a pioneer in MBBR reactor research, China is the country with the largest number of publications and institutions that finance research. Over the period 1993 – 2023, Christensson, M. was the author who stood out the most in terms of number of publications, groups of researchers from different countries published in collaboration. The main axes of research in the time horizon were: adaptation of conventional activated sludge systems to MBBR reactors, costs of biological media and search for alternative materials, performance of MBBR reactors at low temperatures, mathematical modeling of the nitrification process in MBBR reactors, study of biofilms with a view to the simultaneous nitrification/denitrification process and reducing process costs with energy savings.

Keywords: Effluent treatment; MBBR reactor; Biological media

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

EPS – *Extracellular Polymeric Substances*

ETE – Estações de Tratamento de Efluentes

MBBR – *Moving Bed Biofilm Reactor*

NBR – Norma Brasileira

NDS – Nitrificação e Desnitrificação Simultâneas

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

OD – Oxigênio Dissolvido

PU – Poliuretano

PCL – Policaprolactona

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PET – Polietileno Tereftalato

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de um biofilme	22
Figura 2 - Esquema de aeração em reatores MBBR	27
Figura 3 – Fluxograma da metodologia	33
Figura 4 - Número de publicações por ano de 1993 a 2023	35
Figura 5 – Número de publicações acumuladas por ano (1993-2023)	36
Figura 6 -Tipos de documentos publicados (1993-2023)	36
Figura 7- Número de publicações por autor (1993-2023)	38
Figura 8- Principais redes de colaboração entre autores	39
Figura 9 - Principais redes de autores mais citados	40
Figura 10 - Principais afiliações em publicações (1993-2023)	41
Figura 11 - Principais redes de colaboração entre países	42
Figura 12 - Rede de palavras-chave	43
Figura 13 - Palavras-chave mais utilizadas na década de 2010-2019	49
Figura 14 - Palavras-chave mais frequentes na década 2020 - 2023.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formas do nitrogênio presentes no esgoto	16
Tabela 2 - Composição típica de esgotos domésticos (mg/L)	18
Tabela 3 - Mídias biológicas comerciais e principais características	26
Tabela 4 – Reatores MBBR na remoção de nitrogênio (continua)	29
Tabela 4 - Reatores MBBR na remoção de nitrogênio (continuação).....	29
Tabela 5 - Indicadores bibliométricos	31
Tabela 6 - Publicações por área de conhecimentos no período	37
Tabela 7- Publicação por países (1993-2023)	41
Tabela 8 - Principais palavras-chave e frequência (1993-2023)	43
Tabela 9 - Pesquisas financiadas por instituição (1993-2023)	44
Tabela 10 - Número de registro de patentes (1993-2023)	45
Tabela 11 - Trabalhos sobre modelagem matemática (2000-2009)	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1	Considerações Iniciais.....	14
3.2	Ciclo do Nitrogênio	15
3.3	Tratamento de Efluentes	18
3.4	Biofilme.....	20
3.5	Fatores que Influenciam a Nitrificação	22
3.5.1	Oxigênio Dissolvido.....	23
3.5.2	Temperatura	23
3.5.3	pH e Alcalinidade	24
3.6	Reator do tipo MBBR.....	24
3.7	Resultados de Desempenho de reatores MBBR	28
3.8	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
5	RESULTADOS.....	35
5.1	Análise Bibliométrica	35
5.1.1	Tipos de Documentos e Áreas de Conhecimento.....	36
5.1.2	Autores.....	37
5.1.3	Países.....	40
5.1.4	Palavras-Chave	42
5.1.5	Financiadores e Patentes	43
5.2	EIXOS TEMÁTICOS NO HORIZONTE TEMPORAL (1993-2023).....	45

5.2.1	1993-1999.....	45
5.2.2	2000-2009.....	46
5.2.3	2010-2019.....	49
5.2.4	2020-2023.....	51
5.3	TENDÊNCIAS PARA PESQUISAS FUTURAS	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), de 2021, mostram que apenas 55,8% da população é atendida pela coleta de esgoto e do total coletado apenas 51,2% são tratados. O esgoto sanitário é constituído de aproximadamente 99,9% água e 0,1% de sólidos. Dessa parcela de sólidos, aproximadamente 70% são de origem orgânica, sendo composto em sua maioria por proteínas, carboidratos, e óleos e gorduras (VON SPERLING, 2005; METCALF; EDDY, 2016). Os compostos orgânicos são grandes poluidores dos corpos hídricos, por contribuírem para o consumo de oxigênio dissolvido, fornecer macronutrientes, em especial o nitrogênio e o fósforo, que merecem atenção, pois possuem efeito fertilizante nas algas e outras plantas, acentuando a poluição (CHEN *et al.*, 2022).

A partir do século XX houve maior desenvolvimento do tratamento de esgoto, inicialmente com as estações fora da área urbana e hoje já dentro das grandes cidades (CHEN *et al.*, 2022). Até os anos 1970 o tratamento de efluentes estava associado à remoção de sólidos suspensos e flotáveis, ao tratamento de orgânicos biodegradáveis e à eliminação de organismos patogênicos, a partir da década de 80 a ênfase passou a ser os efeitos de longo prazo sobre a saúde da população e os impactos ao meio ambiente (METCALF e EDDY, 2016).

O crescimento das cidades fez surgir a necessidade de tratamentos mais compactos, enquanto a mudança no enfoque do tratamento fez com que tratamentos mais eficientes fossem almejados. A partir de tais mudanças, processos como filtros biológicos aerados, reatores de leito fluidificado, reatores de biofilme de leito móvel e outros foram desenvolvidos. O reator biológico com leito móvel (MBBR) do inglês *Moving Bed Biofilm Reactor* foi desenvolvido na Noruega no final da década de 1980 e início dos anos 90, com foco na remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. As vantagens em relação ao processo convencional de lodos ativados são: necessidade de menor área, ou seja, o tratamento é compacto, o resultado do tratamento depende muito menos da separação final do lodo, o que facilita a operação.

Esta tecnologia é de grande sucesso em todo o mundo no tratamento de efluentes domésticos e industriais.

A partir de uma análise bibliométrica este trabalho teve como objetivo avaliar de forma quantitativa os avanços das pesquisas sobre a nitrificação em reator do tipo MBBR no tratamento de efluentes. O estudo foi feito considerando publicações no período de 1993-2023, abrangendo desde informações sobre o primeiro artigo publicado até as publicações do corrente ano.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a revisão bibliométrica e sistemática da literatura sobre nitrificação em reatores MBBR, tratando efluentes domésticos, de forma a observar como as pesquisas têm abordado o tema ao longo do tempo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar, temporalmente, os trabalhos publicados, mediante aspectos qualitativos e quantitativos os trabalhos publicados, quantitativa e qualitativa;
- Identificar os avanços obtidos nas pesquisas, ao longo das últimas décadas;
- Indicar principais tendências para pesquisas futuras.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O ciclo de uso da água durante as diversas atividades humanas resulta na incorporação de várias de substâncias que alteram suas características, passando a denominar-se de águas servidas, águas residuárias ou esgoto (FUNASA, 2019).

A composição das águas residuárias vai depender dos usos a que foram submetidas e varia com o clima local, situação social, econômica e hábitos da população (VON SPERLING, 2007a).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR nº 9.648/1986, define que o esgoto sanitário como “Despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária”. Esgotos domiciliares são aqueles provenientes de residências, edifícios comerciais, sendo formado por água de banho, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão, detergente e água de lavagem (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

Nas excretas humanas são encontrados restos de alimentos, albuminas, gorduras, hidratos de carbono, proteínas, sais, microrganismos, além da ureia, resultantes das transformações químicas de compostos nitrogenados (FUNASA, 2019).

Os nutrientes, em especial o nitrogênio e o fósforo, causam o fenômeno de eutrofização das águas, definida como o crescimento excessivo de fitoplâncton e plantas aquáticas, a ponto de interferir nos usos desejados do corpo d'água.

Cao (2018) explica que esse fenômeno causa degradação da qualidade das águas deixando-a turva, prejudica a fotossíntese, impacta de maneira indireta a disponibilidade de oxigênio dissolvido e acarreta a morte da flora aquática. Além disso, a degradação da matéria orgânica gera aumento da necessidade de oxigênio, o que leva a morte dos seres aquáticos presentes. Quando o nitrogênio está na forma de amônia pode ser tóxico para os peixes, o que também demanda um maior consumo de oxigênio (MOTA; VON SPERLING, 2009).

Os danos causados no corpo receptor, além de estéticos e recreacionais, levam a condições anaeróbias no fundo do corpo d'água e eventualmente do corpo hídrico

como um todo, o que ocasiona a liberação de maus odores, além de elevar a dificuldade e os custos de tratamento das águas (MOTA; VON SPERLING, 2009).

Na forma de nitrato, o nitrogênio, é associado à doença metemoglobinemia, que é uma condição que atinge principalmente bebês, que ainda não possuem sistema digestivo capaz de transformar o nitrato em formas menos prejudiciais de nitrogênio. A doença é ocasionada quando o íon ferroso (Fe^{2+}), é oxidado pelo nitrito, para seu estado férrico (Fe^{3+}), e com isso a hemoglobina é convertida em metahemoglobina perdendo a capacidade de se ligar ao oxigênio (CAO, 2018)

3.2 CICLO DO NITROGÊNIO

O nitrogênio é um dos principais elementos químicos da natureza, pode ser encontrado em toda biosfera em diversas formas e estados de oxidação (CAO, 2018; FUNASA, 2019). A depender do estado de oxidação o átomo de nitrogênio pode combinar-se com átomos de hidrogênio, oxigênio ou outros átomos de nitrogênio. Essas trocas ocorrem por meio de processos bioquímicos entre o nutriente, a natureza e os microrganismos, e garantem a circulação do nitrogênio (CAO, 2018).

No esgoto doméstico bruto, as formas predominantes são o nitrogênio orgânico e a amônia. O nitrogênio orgânico corresponde a grupamentos amina, enquanto a amônia tem como origem principal a ureia após ser hidrolisada. O nitrogênio amoniacal (NH_4^+), após passar por tratamento, pode ser encontrado na forma de nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-).

É possível saber o estágio da poluição de um corpo d'água pela forma de nitrogênio mais encontrada no meio. Caso a poluição seja recente a forma predominante do nitrogênio será o nitrogênio orgânico ou amoniacal; se forem encontradas maiores concentrações de nitrato significa que a poluição está em estágio mais avançado, mas isso só ocorre se o corpo hídrico em questão tiver oxigênio dissolvido suficiente que permita a nitrificação (FUNASA, 2019). A Tabela 1 apresenta algumas formas do nitrogênio presentes no esgoto e seus respectivos estados de oxidação.

Tabela 1 - Formas do nitrogênio presentes no esgoto

Forma	Fórmula	Estado de oxidação
Nitrogênio gasoso	N ₂	0
Nitrogênio orgânico	variável	variável
Amônia	NH ₃	-3
Íon Amônio	NH ₄ ⁺	-3
Nitrito	NO ₂ ⁻	+3
Nitrato	NO ₃ ⁻	+5

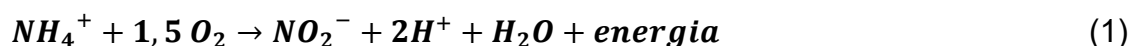
Fonte: Adaptado FUNASA (2019)

No ciclo do nitrogênio ocorrem cinco processos a saber: fixação, amonificação, assimilação, nitrificação e desnitrificação. Harrison (2003) ressalta o importante papel das bactérias na transformação das formas de nitrogênio. Nos parágrafos seguintes, o ciclo do nitrogênio será descrito, conforme Esteves e Amado (2011).

A fixação do nitrogênio atmosférico (N₂) pode ocorrer por meio de descargas elétricas durante tempestades, que fornecem energia suficiente para combinar nitrogênio e oxigênio molecular e formar nitrato. Outra via de fixação do nitrogênio em ambientes aquáticos é por meio de microrganismos como bactérias e cianobactérias (fixação biológica) que utilizam o N₂ como fonte de nitrogênio para seu metabolismo, transformando-o em proteínas.

A amonificação, por sua vez, consiste na transformação de nitrogênio orgânico em amônia, podendo ocorrer em ambientes aeróbios ou anaeróbios, a partir da atividade de organismos heterotróficos.

Na presença de oxigênio, a amônia pode ser oxidada para nitrito (Eq. 1) e em seguida a nitrato (Eq. 2), no processo conhecido como nitrificação. Esse processo é denominado dissimilatório, pois não há assimilação do nitrito e nitrato pelos organismos nitrificantes.



Diferentes gêneros de bactérias participam da nitrificação. Na oxidação da amônia o gênero responsável é o das *Nitrossomonas*, enquanto na oxidação do nitrito o gênero responsável é o das *Nitrobacter*. Estudos revelaram, entretanto, que algumas

Archaeas marinhas podem realizar a nitrificação (REVSBECH *et al.*, 2006). Existem mais gêneros responsáveis pela oxidação de amônia para nitrito, como *Nitrosococcus*, *Nitrosopira*, *Nitrosovibrio* e *Nitrosolobus*. Outros gêneros de bactérias que oxidam o nitrito a nitrato são: *Nitrospira*, *Nitrospina*, *Nitrococcus* e *Nitrocystis* (AHN, 2006).

A última etapa do ciclo do nitrogênio, conhecida como desnitrificação, que é um processo dissimilatório anaeróbico, inicia-se com a redução do nitrato a nitrito (Eq. 3), catalisado por enzimas (nitrato redutases).



A partir do nitrito, três processos são possíveis: (i) a redução dissimilatória do nitrito a amônio ou amonificação do nitrito (Eq. 4), (ii) desnitrificação ou redução do nitrito a nitrogênio molecular (Eq. 5) e (iii) processo Anammox (*anaerobic amonium oxidation*) ou oxidação dissimilatória do íon amônio em ambiente anaeróbico, utilizando o nitrito como acceptor de elétrons (Eq. 6). Este último é realizado por bactérias anammox.



Mais recentemente, o óxido nitroso (N₂O) foi apontado também como uma das formas de nitrogênio que causa preocupação, já que sua emissão tem significativa contribuição para o efeito estufa, e chega a ser 300 vezes maior em comparação com o CO₂, sendo atualmente o terceiro mais importante gás de efeito estufa presente na atmosfera, atrás somente do CO₂ e do CH₄ (SOUZA *et al.*, 2019).

Como visto, o ciclo do nitrogênio é complexo o seu entendimento é de grande interesse, visto que diversas formas do nitrogênio, quando presentes em corpos hídricos, podem causar impactos negativos como eutrofização, demanda de oxigênio e toxicidade para a vida aquática. Nos sistemas de tratamento de esgotos dependendo da condição ambiental aplicada, ocorrem diversas conversões de espécies nitrogenadas descritas anteriormente (SOUZA *et al.*, 2019).

3.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES

Os despejos de esgoto bruto afetam drasticamente a qualidade da água e toda biota aquática do corpo receptor, por isso, é importante que todo esgoto gerado seja coletado e enviado para Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), para que recebam o tratamento adequado. A Resolução CONAMA nº 430/2011, dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, e, em seu Art. 16, estabelece o valor máximo de nitrogênio amoniacal que pode ser lançado, 20 mg/L N (CONAMA, 2011), entretanto, não limita a emissão de outras formas de nitrogênio (CAO, 2018).

Os processos de tratamento de esgotos são formados por operações unitárias e processos, que visam a remoção de substâncias indesejáveis ou a transformação destas em outras (JORDÃO; PESSÔA, 2009). Tais operações podem ocorrer simultaneamente na mesma unidade de tratamento com vistas à remoção de poluentes (VON SPERLING, 2007b). As características do esgoto são consideradas fator determinante para a escolha do tratamento. Na Tabela 2 está indicada a composição de um esgoto doméstico.

Tabela 2 – Composição típica de esgotos domésticos (mg/L)

Parâmetro	Mínimo	Médio	Máximo
DQO total	500	750	1200
DBO	230	350	560
N total	30	60	100
N amoniacal	20	45	75
N Nitrito + N Nitrato	0,1	0,2	0,5
N orgânico	10	15	25
P total	6	15	25
Sulfato	24	36	72
SST	250	400	600
SSV	200	320	480

Fonte: Adaptado de Volcke *et al.* (2022)

Em uma ETE os tratamentos preliminar e primário são processos físicos que focam na remoção de sólidos, o primeiro é voltado para remoção de sólidos grosseiros por meio da utilização de gradeamento e caixas de areia, já o segundo tipo é usado para remoção de sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica, através de decantadores. O tratamento secundário é um processo biológico, que tem o objetivo

de remover matéria orgânica dissolvida e suspensa, e segundo Von Sperling (2007b), a depender da concepção do tratamento local, tratamentos secundários podem remover nutrientes e patógenos. Já um eventual tratamento terciário seria o responsável pela eliminação de nutrientes, patógenos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e sólidos em suspensão, remanescentes.

Processos físico-químicos não são muito usados em tratamentos de esgotos domésticos (JORDÃO; PESSÔA, 2009), processos biológicos no tratamento secundário são mais baratos e mais simples para remoção de matérias orgânica e nutrientes (CANZIANI et al, 2006)

O tratamento biológico é uma reprodução controlada do processo que ocorre naturalmente em corpos hídricos após o lançamento de esgoto (VON SPERLING, 2007b). Bactérias, protozoários, metazoários e vírus atuam na depuração do efluente, sendo o primeiro grupo o mais numeroso e principal responsável pela degradação e os três últimos funcionam mais como controle das populações bacterianas (SIAAP, 2013).

As bactérias liberam enzimas extracelulares que desempenham reações de hidrólise, transformando grandes moléculas em moléculas menores, assim as moléculas podem ser incorporadas pela membrana celular (VON SPERLING, 2007b). A degradação da matéria orgânica e dos nutrientes é feita pelo processo de desassimilação ou catabolismo, respiração ou fermentação, para obtenção de energia que será usada no processo de assimilação ou anabolismo, ou seja, nas reações de crescimento (VON SPERLING, 2007b).

O processo de oxidação da matéria orgânica, através da respiração, ocorre com a doação de elétrons da substância oxidada para o acceptor de elétrons liberar maior quantidade de energia. O oxigênio dissolvido é o composto inorgânico que libera mais energia (VON SPERLING, 2007b). Caso tenha oxigênio no sistema ele será aeróbio, caso não haja oxigênio dissolvido as substâncias oxidadas passarão a doar elétrons para outro acceptor de elétrons, que na falta do oxigênio libere maior energia, podendo ser nitrato, sulfato ou dióxido de carbono (ARCEIVALA, 1981 *apud* VON SPERLING, 2007b). Essa reação determina se um sistema será aeróbio ou anaeróbio. Há ainda bactérias que apesar da preferência pelo do oxigênio, na falta podem utilizar

o nitrato para obter energia, essa condição é chamada de anóxica.

3.4 BIOFILME

Os biofilmes são bioestruturas complexas formadas em superfícies que estão regularmente em contato com a água. Por definição, um biofilme consiste em células procarióticas e outros microrganismos, como leveduras, fungos e protozoários que secretam um revestimento protetor mucilaginoso, conhecido como substâncias poliméricas extracelulares (EPS) (BOLTZ; MORGENROTH, 2016). Pode haver também partículas retidas, substâncias dissolvidas e adsorvidas (CAO, 2014).

As comunidades microbianas no biofilme degradam diferentes nutrientes, como compostos contendo fósforo e nitrogênio, material carbonáceo além de patógenos capturados nas águas residuárias (SEHAR; NAZ, 2016).

De acordo com Melchior (2019), pode-se separar os reatores biológicos de acordo com a forma dominante de aglomeração dos microrganismos. Esta aglomeração pode ser por crescimento disperso, em que os microrganismos crescem sem estrutura de sustentação, ou por crescimento aderido em um meio suporte, formando um biofilme (VON SPERLING, 2007b).

Quando aderidos, os biofilmes podem surgir com o meio suporte estando imerso ou recebendo descargas contínuas ou intermitentes de líquido. Ainda, o meio suporte usado pelos microrganismos pode ser material natural como pedra, areia, seixos ou solo, mas também pode ser função da aglomeração dos próprios microrganismos formando grânulos (VON SPERLING, 2007b). Também podem ser empregados diferentes materiais sintéticos como material suporte dos biofilmes no tratamento de efluentes, a exemplo do poliestireno, polipropileno e da borracha derivada de pneus (SEHAR; NAZ, 2016). Adicionalmente, Fletcher (1980) afirmam que as superfícies usadas como suporte podem ser abióticas, hidrofóbicas e hidrofílicas, como vidro, metal e o plástico.

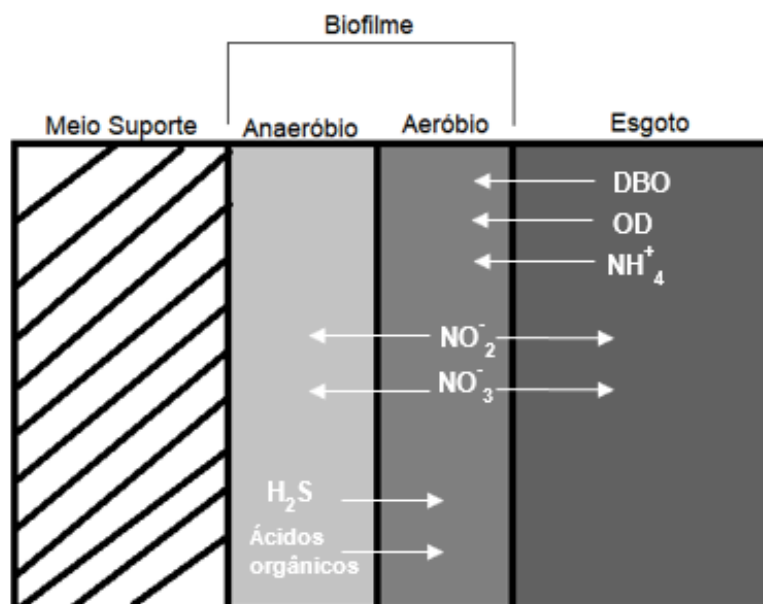
Wolff, Paul e Costa (2010) relataram que a formação de biofilmes se dá por diversos mecanismos moleculares de adesão, agregação e crescimento. A adesão é feita através da produção de polímeros extracelulares, assim, todo microrganismo é capaz de se aderir a um suporte (VON SPERLING, 2007b). Para Cao (2014) a formação de biofilmes se dá pela adesão de microrganismos flutuantes à superfície

do meio suporte, a princípio por interações fracas, e depois de maneira mais fixa por moléculas de adesão celular. Ainda, a autora complementa que depois que uma primeira camada é aderida à superfície outras vão se formando, esse processo tem adesão contínua de várias espécies de bactérias, fungos e protozoários.

Após a formação do biofilme, os compostos (matéria orgânica, nutrientes, oxigênio) usados para crescimento bacteriano são adsorvidos à superfície sendo transportados para as camadas mais profundas por difusão, onde são metabolizados (VON SPERLING, 2007b), por fim o produto do metabolismo é transportado na direção da fase líquida (IWAI; KITAO, 1994 *apud* VON SPERLING, 2007b).

A difusão é de extrema importância para o biofilme, por isso a espessura ideal do biofilme deve ser fina, menor que 100 µm, e uniformemente distribuída (ØDEGAARD; RUSTEN; WESSMAN, 2004). O aumento da espessura em função da formação de novas camadas dificulta a difusão de OD e substrato, criando um gradiente da parte mais externa até as camadas internas, na superfície do meio suporte (OLIVEIRA, 2015). O oxigênio dissolvido é o fator determinante no estabelecimento das camadas, uma vez que o consumo ocorre da camada mais externa para a mais interna (VON SPERLING, 2007b). Assim, tem-se a coexistência de condições aeróbias, anóxicas e anaeróbias, importantes características dos biofilmes que estão indicadas na Figura 1 (IWAI e KITAO, 1994 *apud* VON SPERLING, 2007b).

Figura 1 - Representação esquemática de um biofilme



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2007b).

Em estudo realizado por Melchior (2019), é ressaltada a importância do desprendimento natural das camadas do biofilme, uma vez que permite o crescimento de novos microrganismos sem que a espessura do biofilme fique grande demais e afete a eficiência do tratamento. Espessura muito elevada causa decaimento dos microrganismos pelo consumo de outros microrganismos, pode levar à separação da biomassa do meio suporte, e, caso isso não ocorra, o biofiltro poderá colmatar (IWA; KITAO, 1994 *apud* VON SPERLING, 2007b).

Boltz e Morgenroth (2016) destacam alguns desafios para as pesquisas sobre reatores com biofilmes: (i) o entendimento da ecologia dos biofilmes e elucidação do papel funcional e mecânico das EPS; (ii) as emissões de gases de efeito estufa; e (iii) a modelagem do biofilme e dos reatores de biofilme.

3.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A NITRIFICAÇÃO

A nitrificação é um processo realizado por bactérias autotróficas quimiossintetizantes, ou seja, têm como fonte de carbono o dióxido de carbono (CO_2), e a energia necessária é proveniente das reações químicas. O processo pode ser dividido em duas etapas, na primeira, chamada de nitritação, é onde ocorre a oxidação da amônia para nitrito, já na segunda, chamada de nitratação, o nitrito é oxidado a nitrato (REIS, 2007; CAO, 2014). As reações de nitritação e nitratação são representadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

Bactérias nitrificantes possuem crescimento lento e por isso a nitrificação total em reator de leito móvel é demorada (RUSTEN et al, 2006). A nitrificação pode ser afetada por alguns fatores físicos, químicos e biológicos, como pH, temperatura, oxigênio dissolvido, concentração de substrato e competição por espaço ou nutrientes essenciais por parte dos microrganismos (CHEN; LING; BLANCHETON, 2006).

3.5.1 Oxigênio Dissolvido

As bactérias autotróficas são aeróbias e por isso competem com as bactérias heterotróficas, que degradam matéria orgânica, por oxigênio. As heterotróficas possuem crescimento mais rápido e ocupam mais espaço que as nitrificantes no meio suporte, o crescimento das bactérias é relacionado pela razão DBO_5/NTK^1 sendo que valores maiores que cinco limitam a presenças das nitrificantes (METCALF; EDDY, 2016). Para que haja melhor desempenho das nitrificantes, essa relação DBO e nitrogênio deve ser menor que 3 (ISOLDI; KOETZ, 1998 *apud* REIS, 2007). Estudos de Schmidt *et al.* (2003) reforçam que altas cargas orgânicas inibem a nitrificação, sendo que microrganismos heterotróficos possuem taxa de crescimento cinco vezes maior que os autotróficos.

Na literatura há um consenso que 2 mgO₂/L é o valor mínimo para que ocorra nitrificação (CAO, 2014; METCALF; EDDY, 2016). Isoldi e Koetz (1998) *apud* Almada (2012) sugerem uma concentração maior que 3,5 mgO₂/L, Rusten *et al.* (2006) recomendam valores ainda mais altos, como 6 mg O₂/L. Já valores menores que 0,5 mg O₂/L interrompem o processo (HEINZE *et al.*, 1997).

3.5.2 Temperatura

As bactérias nitrificantes são mesófilas, sendo assim, possuem alta taxa de crescimento em uma faixa de temperatura de 35°C a 40°C, havendo rápido declínio em valores superiores (BARWAL; CHAUDHARY, 2014). Isoldi e Koetz (1998) *apud* Almada (2012) consideram que o melhor desempenho, dependendo dos microrganismos nitrificantes, ocorre na faixa de temperatura de 22°C a 36°C. Quanto mais alta a temperatura mais dinâmica se torna a nitrificação, aumentando o consumo de oxigênio, de alcalinidade e reduzindo o pH, e quanto mais baixa a temperatura menor a atividade das bactérias (OLIVEIRA, 2008).

¹ NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl = Nitrogênio orgânico + Nitrogênio amoniacal

3.5.3 pH e Alcalinidade

Segundo Metcalf e Eddy (2016), a faixa de pH ótima para as nitrificantes é entre 7,5 e 8,0. Entretanto, Sharma e Ahlert (1977) *apud* Chen, Ling, Blancheton (2006) apresentaram em seu trabalho valores mais abrangentes, consideram que a faixa de pH ótimo é de 7,0 a 9,0, sendo que cada gênero de bactéria presente na nitrificação possui um pH ótimo para trabalhar: para as *Nitrosomonas* varia de 7,2 a 8,8, já para as *Nitrobacter* o pH varia de 7,2 a 9,0. Valores fora dessas faixas levam à redução da nitrificação. Nesse sentido, Ahn (2006) frisa que essa redução ocorre para valores abaixo de 7,0, já Wiesmann *et al.* (2007) relatam que a diminuição do processo ocorre com pH abaixo de 5,5 e maior que 9,0. Segundo Scheeren *et al.* (2011), valores extremos de pH promovem hidrólise da membrana celular e cessam os processos metabólicos vitais para as bactérias.

Além do pH, a alcalinidade também afeta a nitrificação. De acordo com Cao (2014) durante o processo de nitrificação há liberação de H^+ , ou seja, ocorre um consumo de alcalinidade do meio reacional e conseqüente diminuição do pH, o que pode ser verificado pela Eq. 1.

3.6 REATOR DO TIPO MBBR

O MBBR foi concebido de forma a juntar as melhores características do lodo ativado e dos processos de biofilme (ØDEGAARD; RUSTEN; WESSMAN, 2004). Atualmente, a tecnologia dos leitos móveis está sendo usada para remoção da matéria orgânica carbonácea, nitrogênio e fósforo (OLIVEIRA, 2015; CAO, 2014). Além do mais, a tecnologia MBBR pode ser usada para atualizar outros sistemas de ETEs existentes (AYGUN; NAS; BERKTAY, 2008; WOLFF; PAUL; COSTA, 2010; BARWAL; CHAUDHARY, 2014).

Dentre as vantagens dos sistemas MBBR em relação aos lodos ativados, pode-se apontar: (i) menor área; (ii) simplicidade operacional, pois não há necessidade de descarte nem recirculação de lodo; e (iii) robustez para absorver os picos de vazões em períodos de chuva. Em relação às limitações, algumas delas são: (i) maior consumo de energia para manter a concentração de OD necessária; (ii) utilização de meios suporte patenteados; (iii) dificuldades operacionais na remoção do meio suporte para a manutenção dos difusores de ar (METCALF; EDDY, 2016).









O MBBR é um reator que possui em seu interior meios suportes em suspensão, de forma a manter maior quantidade de biomassa ativa e maior quantidade de substrato para degradação (OLIVEIRA, 2015), assim, altas taxas de remoção de matéria orgânica e nitrogenada são obtidas em um tempo de detenção hidráulica (TDH) baixo (CAO, 2014). É demonstrado que o MBBR pode ser usado em um processo de alta taxa, extremamente compacto (TDH < 1 h) para tratamento secundário de efluentes (ØDEGAARD; RUSTEN; WESSMAN, 2004).

O material suporte original e mais usado (K1) é feito de polietileno de alta densidade, 0,95 g/cm³ (ØDEGAARD *et al.*, 2004). A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) sugere que a densidade deve ser entre 0,92 e 0,98 (ABNT, 2011).

A área superficial e a fração de recheio são parâmetros importantes no funcionamento de reatores MBBR (AYGUN; NAS; BERKTAY, 2008). A área está relacionada à quantidade de microrganismos presentes no tratamento e, portanto, está diretamente ligada ao desempenho do sistema (OLIVEIRA, 2015). No Brasil, a NR 12.209/2011 recomenda que o material suporte tenha superfície específica interna superior a 250 m²/m³ (ABNT, 2011). Ødegaard *et al.* (2000) apresentaram estudos mostrando que a eficiência do tratamento depende da superfície total disponível para crescimento da biomassa, logo, é de entendimento de Wolff, Paul e Costa (2010) a compensação da baixa superfície total do meio com uma alta taxa de preenchimento.

A rugosidade, porosidade e forma, do material, também são importantes para colonização bacteriana, logo são critérios a serem considerados na hora da escolha mídia biológica (WOLFF; PAUL; COSTA, 2010). Na Tabela 3 são apresentados diferentes meios suporte de plástico (PEAD) usados em reatores MBBR.

Tabela 3 - Mídias biológicas comerciais e principais características

Referência comercial	XLB-01	XLB-02	XLB-03	XLB-08
Fabricante: IBP Technology				
Densidade (g/cm³)	0,96-0,98	0,96-0,98	0,96-0,98	1,02-1,05
Diâmetro e altura (mm)	12 e 9	11 e 7	10 e 7	5 e 10
Área superficial (m²/m³)	> 800	> 900	> 1000	> 3500
Referência comercial	MBBR019	MBBR040	MBBR061	MBBR064
Fabricante: Nihao				
Densidade (g/cm³)	0,94-0,96	0,94-0,96	0,94-0,96	0,94-0,96
Diâmetro e altura (mm)	25 e 12	15 e 15	25 e 4	25 e 4
Área superficial (m²/m³)	> 650	> 900	> 1250	> 650

Fonte: Elaborada pela autora a partir dos sites dos fabricantes² (2023)

A fração de enchimento ou de recheio, porcentagem de quanto do reator é ocupado por meios suportes, é fundamental para que as mídias biológicas se movam sem restrições dentro do reator. A NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) e Aygun, Nas e Berktaş (2008) sugerem que a fração deve ser de 30 a 70%.

Porém, na literatura não há consenso do valor da razão de recheio. Jordão e Pessoa (2011) *apud* Fonseca (2016) sugerem que a porcentagem deve ser de 40 a 70%, outros autores como Canler *et al.* (2012), Leiknes e Ødegaard (2001) e Reis (2007) recomendam valores mais restritos, o primeiro recomenda de 60 a 65%, os dois últimos sugerem de 60 a 70%. A maioria dos trabalhos recomenda que o valor seja inferior a 70% (CAO, 2014; ØDEGAARD; RUSTEN; WESSMAN, 2004, RUSTEN

² <https://www.nihaowater.com/product/mbbr/>; <https://ibpvn.com/products/mbbr-biofilter-media>

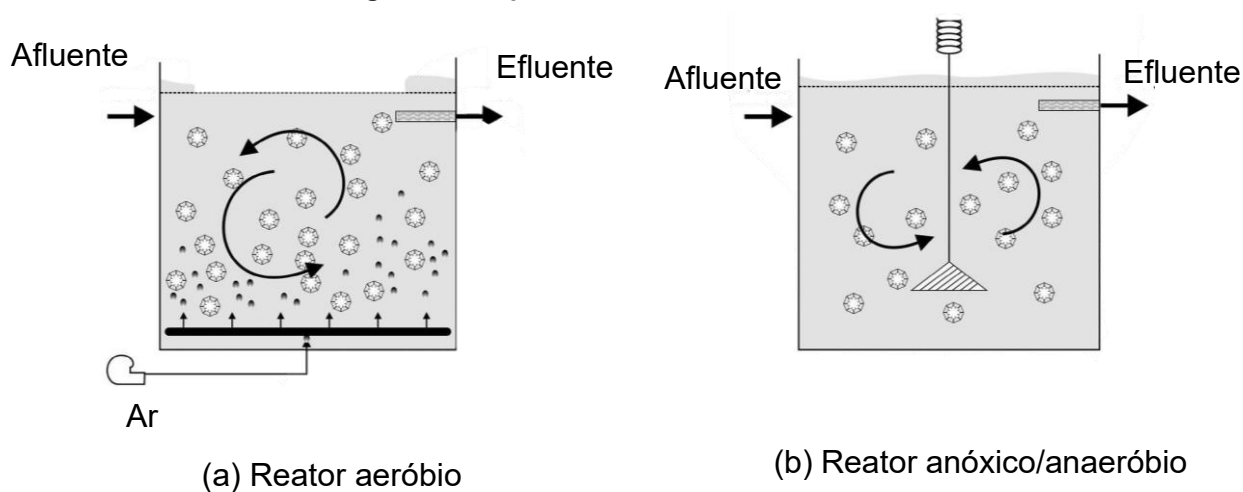
et al., 2006). A taxa de enchimento e a área específica dos portadores de biofilme são os dois principais parâmetros de projeto, segundo Aygun, Nas e Berktaş (2008).

A movimentação das mídias biológicas em função da agitação do fluxo de ar está diretamente ligada com o desprendimento natural dos biofilmes (ALMADA, 2008). Reis (2007), em sua pesquisa, relacionou o desprendimento e conseqüente controle da espessura do biofilme às colisões partícula-partícula e partícula-parede.

Jenkins e Sanders (2012) *apud* Barwal e Chaudhary (2014) afirmam que o reator de leito móvel é uma tecnologia simples, mas robusta, flexível e compacta. Além de possuir baixa produção de biossólidos, logo, os custos com disposição final são menores, ainda tem a vantagem de menor perda de carga (AYGUN; NAS; BERKTAY, 2008). Todo volume do tanque é usado para crescimento da biomassa, ao contrário da maioria dos reatores de biofilme, e não precisa fazer reciclo de lodo, como o reator de lodos ativados (RUSTEN *et al.*, 2006).

O reator pode ser usado para processos aeróbios, anóxicos ou anaeróbios (ØDEGAARD; RUSTEN; WESSMAN, 2004), no primeiro caso a agitação é feita pelo sistema de aeração (Figura 2a) e nos demais a movimentação dá-se por um misturador (Figura 2b) (RUSTEN *et al.*, 2006). Assim, os suportes se movem livremente pelo volume do reator, sendo mantidos no seu interior por peneiras instaladas na saída (ØDEGAARD; RUSTEN; WESSMAN, 2004).

Figura 2 - Esquema de aeração em reatores MBBR



Fonte: Adaptado Barwal e Chaudhary (2014)

3.7 RESULTADOS DE DESEMPENHO DE REATORES MBBR

Alguns trabalhos recentes, sobre desempenho de reatores MBBR na nitrificação, com diferentes meios suportes (comerciais e alternativos) e condições operacionais, são apresentados de forma resumida na Tabela 4. Os estudos consideram diferentes tipos de meios suportes, tipos de efluentes e regime de alimentação dos reatores.

Tabela 4 - Reatores na remoção de nitrogênio (continua).

Objetivo	Condições experimentais			Principais resultados	Referência
	Regime de alimentação	Meio Suporte	Efluente		
Avaliar a eficiência de um sistema formado por um SBR e dois MBBR no tratamento de efluentes após sedimentação primária, com baixa carga orgânica e baixa relação C/N	Batelada	LEVAPOR (20.000 m ² /m ³) e K3 (600 m ² /m ³)	Doméstico	Reatores MBBRs: DQO reduziu para menos de 50mg/L. N-NH ₄ - reduziu para menos de 5mg/L O MBBR que usa meio suporte LEVAPOR apresentou nível estável e elevado de biomassa e grande diversidade bacteriana, o que contribuiu para o seu melhor desempenho	Guo <i>et al.</i> (2019)
Estudar a eficiência de um MBBR com meio suporte alternativo impressos em 3D, fabricado em 13X e bentonita	Batelada	3D fabricado com 13X e bentonita; e K1 (comercial)	Águas residuárias	DQO: Controle: 88% MBBR K1: 92% MBBR 3D: 84% N total: Controle: 32,4% MBBR K1: 37,8% MBBR 3D: 47.2%	Banti <i>et al.</i> (2023)
Avaliar a eficiência da nitrificação em um MBBR para tratamento de lixiviado	Contínuo	MWTP	Lixiviado de aterro sanitário	NH ₄ – N: > 60%	Xiong <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Tabela 4 - Reatores MBBR na remoção de nitrogênio (continuação)

Objetivo	Condições experimentais			Principais resultados	Referência
	Regime de alimentação	Meio Suporte	Efluente		
Estudar a eficiência da remoção de nitrogênio total em reator MBBR inoculado com bactérias heterotróficas de nitrificação-desnitrificação aeróbica	Contínuo	K1	Sintético e Doméstico	O MBBR apresenta aumento de 65% de remoção do nitrogênio total em relação ao lodo ativado	Zhang <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Elaborada pela autora (2023)

3.8 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A revisão bibliométrica é definida como a aplicação estatística na análise de documentos (PRITCHARD, 1969ref), ou seja, o objetivo da revisão é uma análise quantitativa da produção científica de determinado tema. De acordo com Araújo e Alvarenga (2011) a bibliometria funciona como indicativo de comportamento e desenvolvimento de uma área do conhecimento. Ainda, o estudo bibliométrico ajuda a organizar as pesquisas já realizadas em determinada área e identificar problemas que podem se tornar objeto de outras pesquisas (CHUEKE; AMATUCCI, 2015).

O estudo quantitativo ocorre a partir do número de artigos, de citações, instituições, frequência da autoria de artigos entre outros fatores, que são determinando por leis e conceitos. Okubo (1997) e Löbler *et al.* (2019) definem esses indicadores, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Indicadores bibliométricos

Indicador	Definição
Número de publicações	Quantifica a produção científica por autor/país/grupo de pesquisa/instituições
Número de citações	Mede a frequência na qual um artigo é citado e seu impacto na comunidade científica
Número de co-autores	Quantifica a colaboração em nível nacional ou internacional entre pesquisas individuais ou grupos de pesquisa
Número de co-publicações	Mensura a interação científica entre instituições, países
Número de patentes	Indica o quanto é investido em ciência e tecnologia
Número de afiliações	Mede a taxa de trocas científicas entre países em determinado período e em uma área específica
Laços científicos	Mede a rede de influência entre comunidades científicas
Número de co-citações	Mede o número de vezes que dois ou mais artigos são citados simultaneamente no mesmo artigo
Lei de Lotka	Número de autores que contribuem para uma determinada área de pesquisa
Lei de Zipf	Frequência que uma palavra aparece em um documento
Lei de Bradford	Número de trabalhos em um conjunto de periódicos

Fonte: Adaptado de Okubo (1997) e Löbler *et al.* (2019)

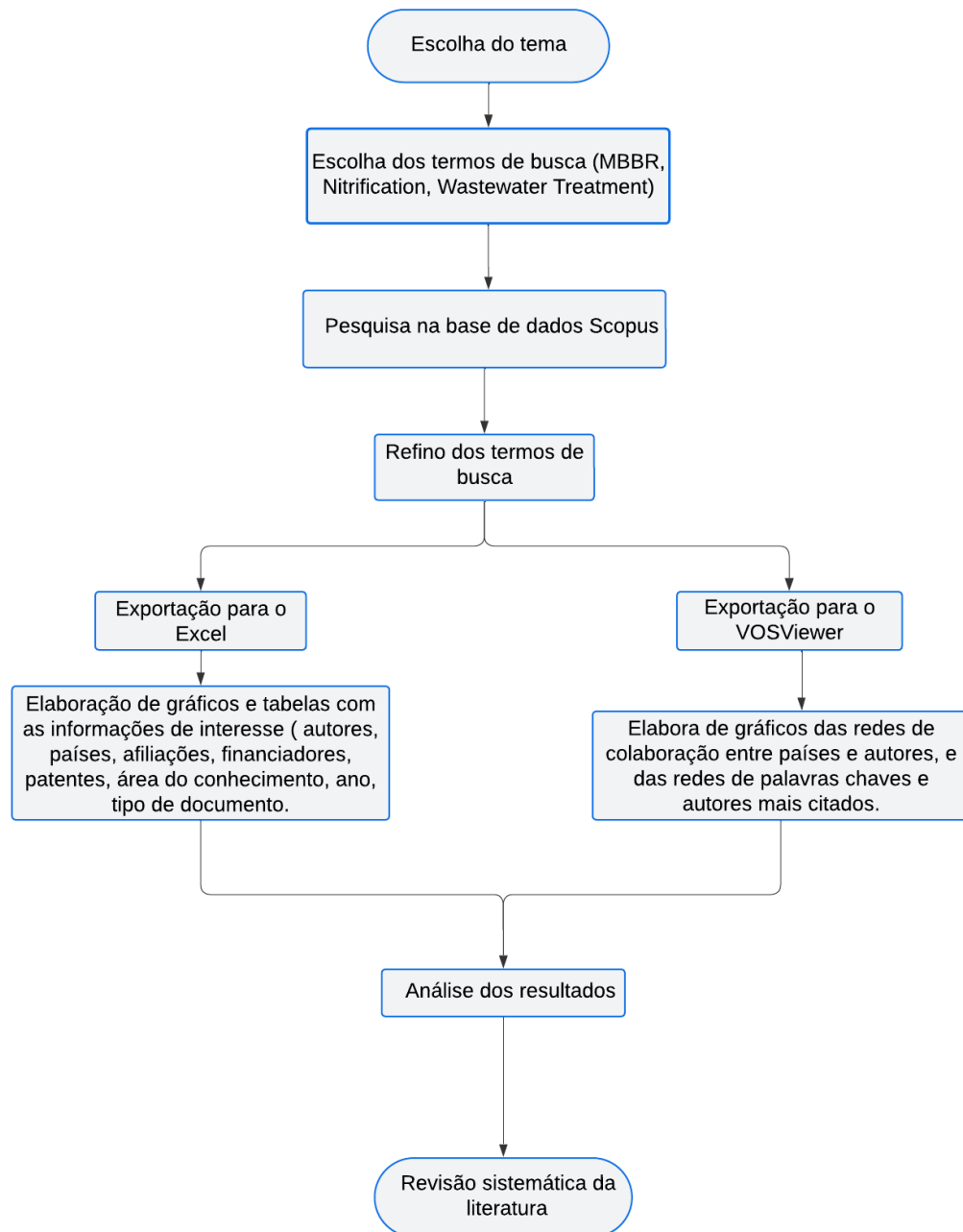
De acordo com Chueke e Amatucci (2015), a revisão bibliométrica é um tipo de revisão sistêmica de literatura e por isso deve deixar claro sua importância. Quando há descaracterização da aplicação da estatística, segundo Soaes, Picolli e Casagrande (2018), a revisão bibliométrica passa a ser classificada como pesquisa bibliográfica.

No Brasil, a revisão bibliométrica começou a ser utilizada na década de 1970 através do curso de Ciência da Informação (ARAÚJO; ALAVARENGA, 2011). Desde então segundo Löbler *et al.* (2019) houve um crescimento não linear no número de estudos feitos a partir da análise bibliométrica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 3 mostra um fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

A análise bibliométrica foi realizada a partir da base de dados *Scopus*, de fácil acesso no portal Periódicos CAPES, por meio da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), da qual a Universidade Federal de Alagoas é integrante.

Foram realizadas duas pesquisas no dia 03 de setembro de 2023. A primeira foi feita utilizando as seguintes palavras-chave: *MBBR*, *Nitrification* e *Wastewater Treatment*, da qual retornaram 243 trabalhos. Estes termos deveriam constar no título, resumo ou palavras-chave da publicação. Entretanto, os resultados encontrados foram muito abrangentes e para melhor representar o conteúdo do TCC, foi feito um refinamento das palavras-chave, excluindo tratamento de lixiviados de aterros sanitários, efluentes salinos, de petróleo, corantes e outros efluentes, dessa forma retornaram 232 trabalhos, a partir dos quais foi realizada a análise bibliométrica.

As informações obtidas a partir da base de dados *Scopus* foram salvas em formato *comma-separated values* (CSV) e exportadas para os programas *Excel* e *VOSViewer*. No primeiro caso foram gerados gráficos e tabelas, já o segundo *software* foi utilizado com a finalidade de facilitar a visualização das redes de colaboração entre países e autores, palavras-chave.

Ao final, foi realizada uma avaliação do horizonte temporal, em décadas, para melhor conhecimento da tendência dos temas das publicações, com leitura e descrição de alguns trabalhos considerados relevantes, pelo critério de quantidade de citações e trabalhos nacionais.

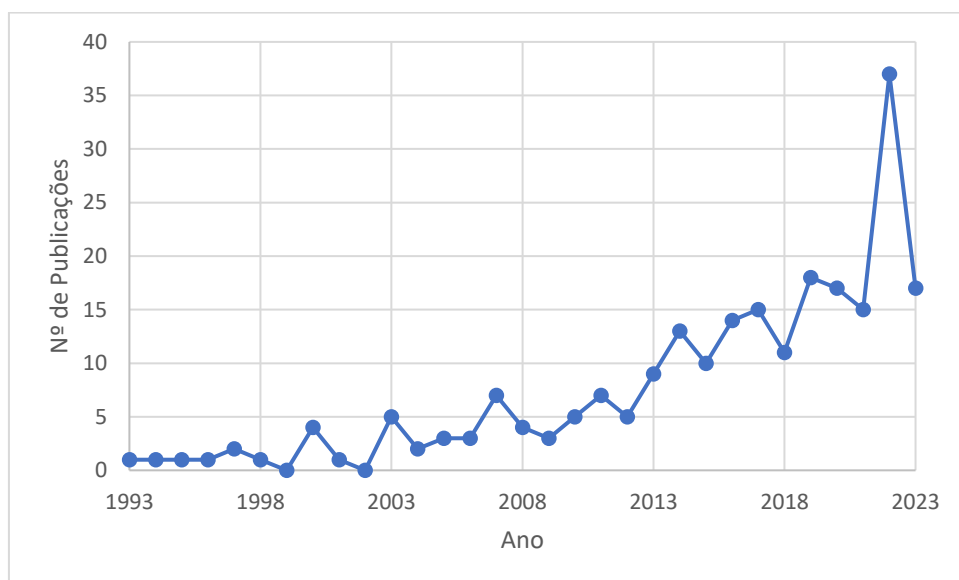
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Os estudos sobre reatores do tipo MBBR começaram no final da década de 1980 e início dos anos 1990, sendo o primeiro trabalho publicado em 1993. Assim, o horizonte desta pesquisa foi definido deste ano até os dias atuais (2023).

Nos anos que se seguiram as publicações sobre o tema foram aumentando gradativamente. Contudo a partir de 2003 há um evidente crescimento no número de publicações que atinge seu auge em 2022, com 37 publicações, como mostra a Figura 4.

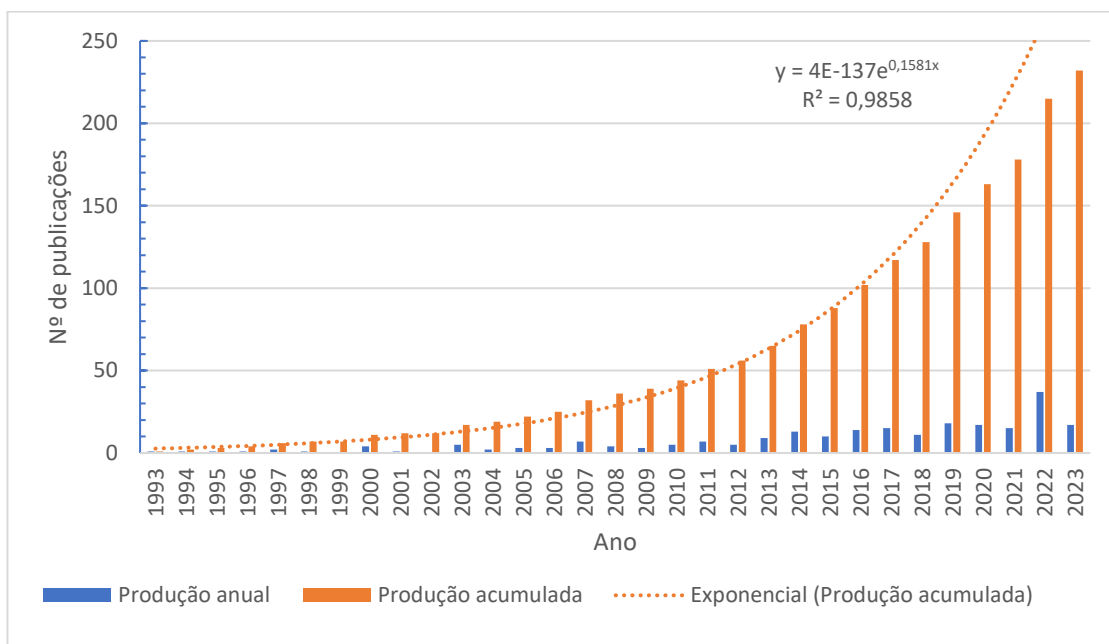
Figura 4 - Número de publicações por ano de 1993 a 2023



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Na Figura 5, observa-se uma tendência de crescimento exponencial em relação às publicações acumuladas ao longo desses 30 anos. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9858$) próximo a 1, indica um bom ajuste dos dados ao modelo exponencial.

Figura 5 – Número de publicações acumuladas por ano (1993-2023)

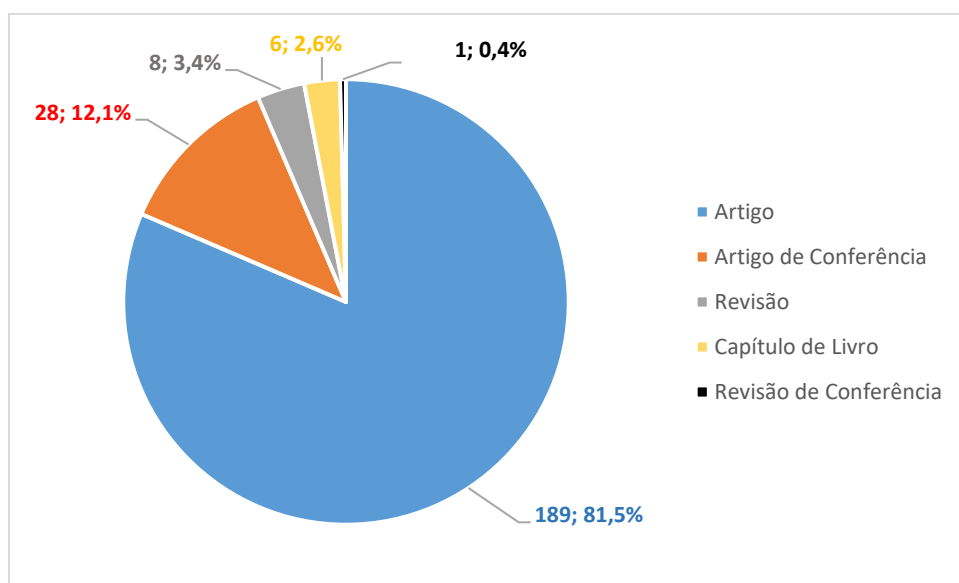


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

5.1.1 Tipos de Documentos e Áreas de Conhecimento

Analisando os tipos de publicações percebe-se que os artigos (189) aparecem em grande maioria e representam 81,5% dos documentos, conforme indicado na Figura 6.

Figura 6 -Tipos de documentos publicados (1993-2023)



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Fazendo uma análise por área do conhecimento (Tabela 6) tem-se que 194 publicações são na área de Ciências Ambientais, valor maior que o dobro das publicações da segunda área, Engenharia Química. Observa-se que um mesmo documento pode estar associado a mais de uma área de estudo na base de dados *Scopus*. Assim, as áreas do conhecimento são as mais variadas.

Tabela 6 - Publicações por área de conhecimento (1993-2023)

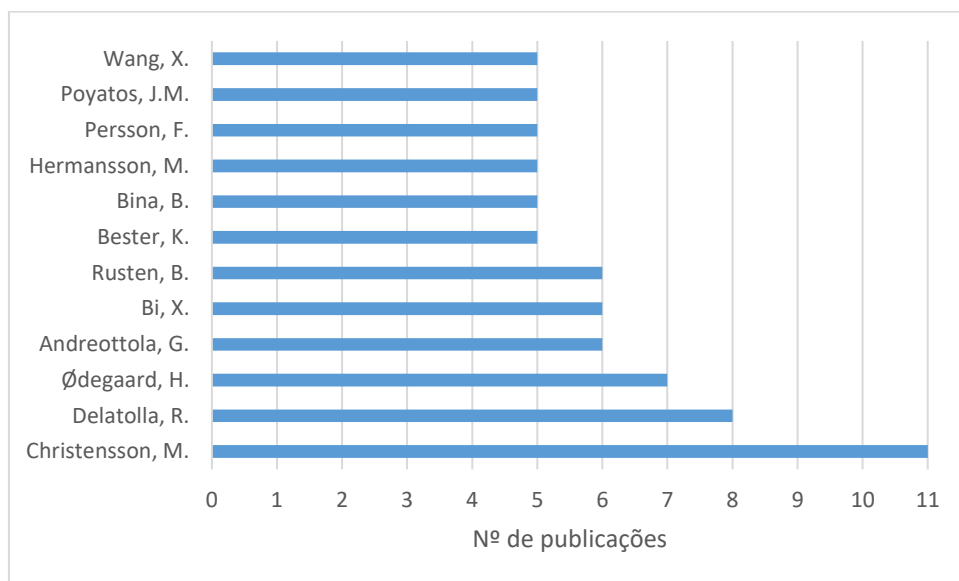
Área do conhecimento	Nº de publicações
Ciências Ambientais	194
Engenharia Química	57
Engenharia	35
Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	27
Energia	26
Química	24
Imunologia e Microbiologia	15
Medicina	11
Ciências Agrárias e Biológicas	7
Ciência de Materiais	4
Física e Astronomia	4
Matemática	2
Multidisciplinar	2
Negócios, Gestão e Contabilidade	1
Ciência da Computação	1
Enfermagem	1

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

5.1.2 Autores

Na Figura 7 observa-se a relação do número de publicações por autores, sendo o autor com maior destaque Christensson, M., com 11 publicações, da empresa *Veolia Water Technologies AB – AnoxKaldnes*, Lund, Suécia. Em segunda colocação está o autor canadense Delatolla, R., do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Ottawa, com 8 publicações sobre o tema. Dois dos autores pioneiros na publicação de 1993, Ødegaard, H. e Rustin, B., do Instituto Norueguês de Tecnologia, Universidade de Trondheim, também figuram entre os dez autores que mais publicaram.

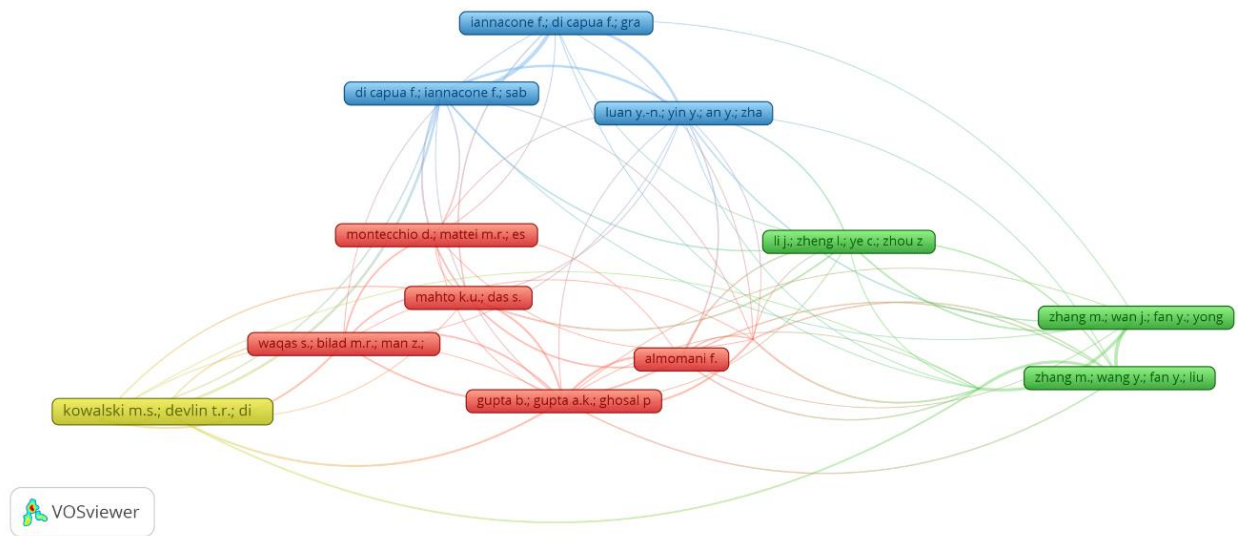
Figura 7- Número de publicações por autor (1993-2023)



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Em relação à colaboração entre autores, foi utilizado um filtro de pelo menos 3 publicações em conjunto, com isso o VOSViewer retornou 15 autores que se destacaram em relação à colaboração. A Figura 8 mostra a rede de colaboração na qual o grupo de pesquisa formado por Di Capua *et al.* apresenta a maior quantidade de trabalhos em colaboração com outros grupos, com 38 ligações. Já o grupo de pesquisa formado por Montecchio, D. *et al.* é o que menos possui colaborações com apenas 11 ligações com outros grupos.

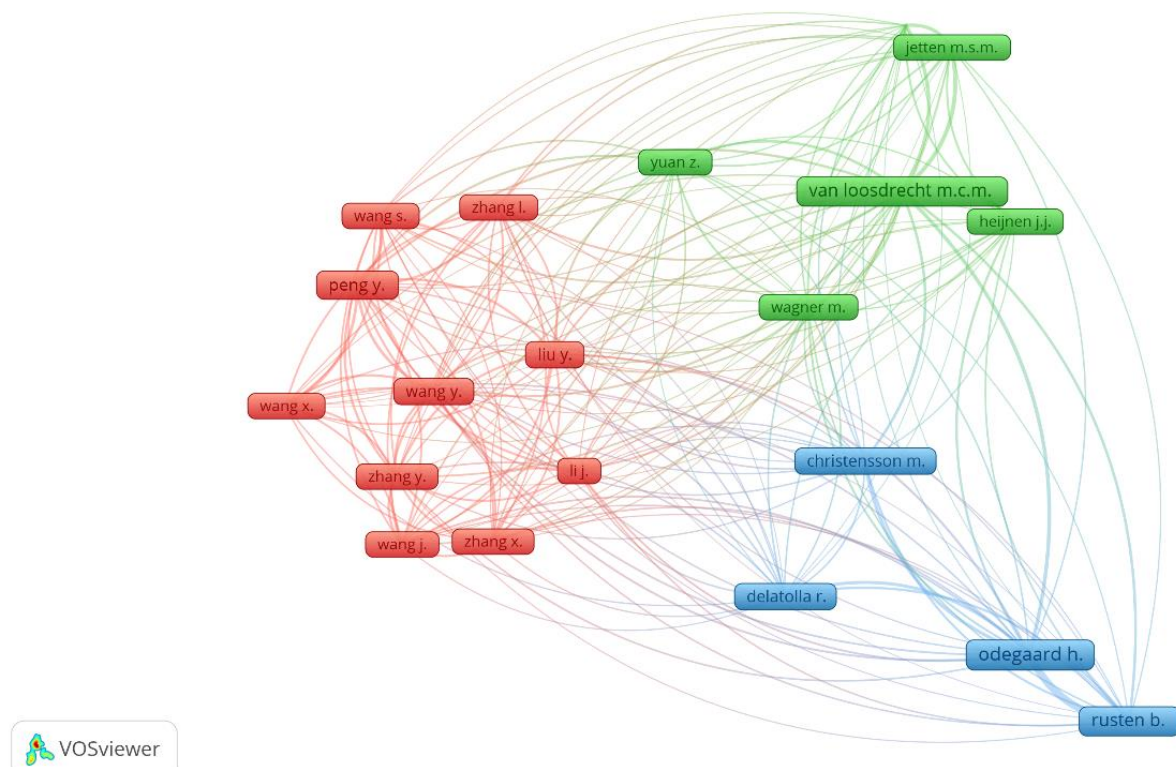
Figura 8- Principais redes de colaboração entre autores



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Analisando os autores mais citados quanto maior a caixa do nome mais citações tem o autor. É perceptível que Ødegaard, H. aparece em destaque, uma vez que foi um dos pioneiros nos estudos sobre reatores do tipo MBBR, tendo 301 citações. Ødegaard, H. é seguido por Van Loosdrechat, M.C.M. e por Rusten, B., cada um com 241 e 217 citações, respectivamente. A Figura 9 apresenta os 20 autores mais citados que tiveram seus trabalhos mencionados em pelo menos 20 documentos.

Figura 9 - Principais redes de autores mais citados



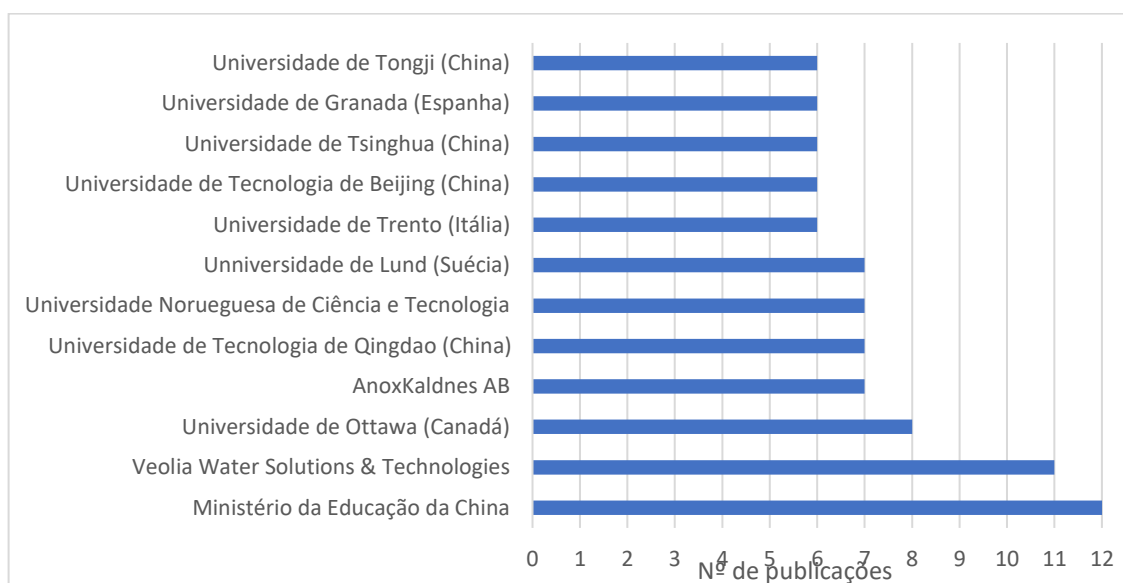
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

5.1.3 Países

Na Figura 10 são indicadas as principais afiliações associadas aos trabalhos publicados. O Ministério da Educação da China aparece em primeiro com 12 publicações, o segundo colocado é a empresa, *Veolia Water Technologies AB* (11 publicações) e em terceira colocação a Universidade de Ottawa, Canadá, com 8 publicações. Somando todas as publicações por afiliações a China é o país que mais publica sobre o tema. Em alguns casos é possível mais de um país ser responsável por uma mesma publicação, em função da rede de cooperação internacional dos grupos de pesquisadores.

Na Tabela 7 são apresentados os dados de publicações por países, em que a China se destaca com 30,2% dos trabalhos, bem acima do segundo colocado, Suécia, com 10,8%. O Brasil ocupa a 13ª posição no *ranking*, juntamente com Estônia, Iraque, Qatar, Singapura e Turquia, com apenas 1,3% das publicações.

Figura 10 - Principais afiliações em publicações (1993-2023)



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Tabela 7- Publicações por país (1993-2023).

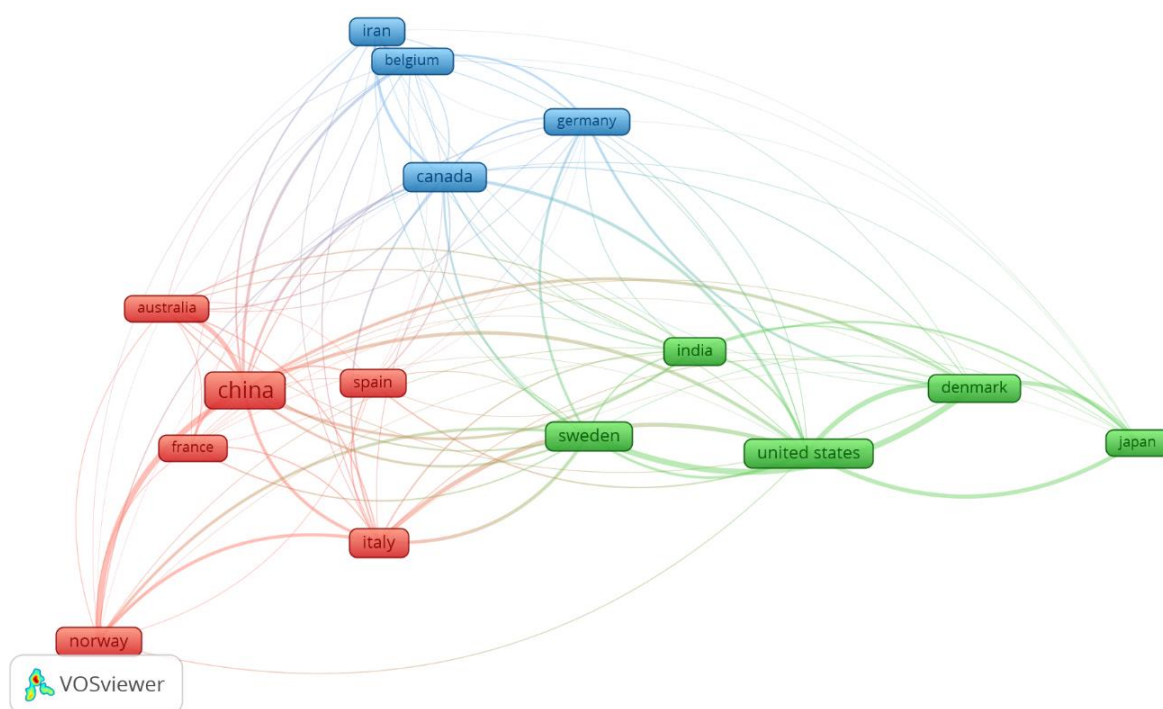
País	Nº de publicações	%	País	Nº de publicações	%
China	70	30,2	Alemanha	7	3,0
Suécia	25	10,8	Austrália	6	2,6
Estados Unidos	21	9,1	França	6	2,6
Canadá	20	8,6	Bélgica	5	2,2
Noruega	19	8,2	Japão	5	2,2
Itália	17	7,3	Holanda	4	1,7
Irã	11	4,7	Eslovênia	4	1,7
Dinamarca	10	4,3	Coreia do Sul	4	1,7
Índia	10	4,3	Brasil	3	1,3
Espanha	10	4,3	-	-	

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Dentre os trabalhos desenvolvidos no Brasil, está o de Araujo Junior, M.M.D., Lermontov, A., Araujo, P.L.D.S. e Zaiat, M., publicado em 2009 sob o título *Reduction of sludge generation by the addition of support material in a cyclic activated sludge system for municipal wastewater treatment*. Os pesquisadores são da Bio Proj. Tecnologia Ambiental e da Universidade de São Paulo, São Carlos.

As parcerias entre de grupos internacionais podem ser observada na rede de colaboração de países na Figura 11. Dos 48 países que tiveram publicações associadas ao tema em questão, destacam-se os 15 países que possuem pelo menos 5 publicações colaborativas. Os Estados Unidos possuem publicações em parceria com o Japão, Dinamarca, Índia e Suécia, representados pela cor verde (*cluster 1*). Enquanto a China, país com maior número de publicações, fez parceria com 16 países podendo-se destacar Noruega, Itália, França, Espanha e Austrália (*cluster 2* representado pela cor vermelha). Já o Canadá, a Alemanha, a Bélgica e o Iran compõem um outro grupo de colaboração (*cluster 3*, em azul).

Figura 11 - Principais redes de colaboração entre países



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

5.1.4 Palavras-Chave

Dentre os 232 artigos exportados da base de dados *Scopus* para o VOSViewer foram filtradas as 30 palavras-chave que apareceram em pelo menos 5 documentos. A Figura 12 apresenta a rede de palavras-chave por ordem cronológica em que os temas azulados foram mais usados em pesquisas mais antigas, anteriores a 2015. Já

5.1.5 Financiadores e Patentes

Dentre as instituições que mais financiaram estudos sobre o tema no período de 1993-2023, as chinesas se destacam (Tabela 9), o que reforça a importância de apoio à pesquisa na supremacia da China como o país que mais publicou trabalhos científicos sobre tratamento de efluentes pela tecnologia MBBR. O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, ambos do Brasil, aparecem em 7º lugar, com dois projetos financiados, cada instituição, lembrando que o apoio da CAPES se dá na forma de concessão de bolsas de estudos e apoio a programas de cooperação internacional.

Tabela 9 - Pesquisas financiadas por instituição (1993-2023)

Instituição	Nº de pesquisas financiadas	País
Fundação Nacional de Ciências Naturais da China	24	China
Conselho de Pesquisa em Ciências Naturais e Engenharia do Canadá	10	Canadá
Conselho de Pesquisa da Noruega	6	Noruega
Programa Chave de Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologia de Shandong	5	China
Fundação Científica de Pós-Doutorado da China	4	China
Fundação Nacional de Ciências	4	Estados Unidos
Departamento de Ciência e Tecnologia, Ministério de Ciência e Tecnologia, Índia	3	Índia
Fundos de Pesquisa Fundamental para as Universidades Centrais	3	China
Programa Principal de Ciência e Tecnologia para Controle e Tratamento da Poluição da Água	3	China
Programa Nacional Chave de Pesquisa e Desenvolvimento da China	3	China
Conselho de Pesquisa Sueco	3	Suécia
Agência de Proteção Ambiental dos EUA	3	Estados Unidos
Fundação de Pesquisa da Água	3	Estados Unidos
Universidade Agrícola de Anhui	2	China
Conselho de Pesquisa da Austrália	2	Austrália
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	2	Brasil
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	2	Brasil

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Dos trabalhos relacionados neste levantamento bibliométrico foram registradas 63 patentes (Tabela 10), o que demonstra ser uma área com grandes possibilidades de inovação tecnológica. O destaque neste quesito é o Escritório de Marcas e Patentes dos Estados Unidos com 45 registros de patentes, ou seja 71,4%.

Tabela 10 - Número de registros de patentes (1993-2023).

Escritório de patente	Nº de registros	%
Escritório de Marcas e Patentes dos Estados Unidos	45	71,4
Escritório de Patentes do Japão	8	12,7
Organização Mundial de Propriedade Intelectual	5	7,9
Escritório de Patente Europeu	3	4,8
Escritório de Propriedade Intelectual do Reino Unido	2	3,2
Total	63	100

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

A primeira patente, segundo levantamento, foi registrada em 1997, referente ao processo de tratamento (“Processo e dispositivo para tratamento de lodo ativado”). Foram propostos um novo acoplamento de MBBR e uma aeração de lodo ativado.

Uma das patentes registradas foi relativa a elemento suporte para biomassa com título “Método, Aparelho e Elemento Suporte de Biomassa para Tratamento Biológico de Águas Residuárias”, do Escritório de Patente Europeu, em 2012. As patentes encarecem os valores dos meios suportes, e, conseqüentemente, aumentam os custos dos sistemas de tratamento por reatores do tipo MBBR. Neste sentido, muitas pesquisas sobre meios suportes alternativos são realizadas a exemplo de Orantes e González-Martínez (2004).

5.2 EIXOS TEMÁTICOS NO HORIZONTE TEMPORAL (1993-2023)

Nesta seção, os principais eixos temáticos explorados em cada década do período de 1993 a 2023 foram comentados. Ressalta-se que das 232 publicações, apenas 40 foram de acesso aberto. As demais só foi possível o acesso aos resumos.

5.2.1 1993-1999

Os estudos sobre reatores do tipo MBBR começaram no final da década de 1980 e início dos anos 1990. Entretanto, o primeiro trabalho indexado à base de dados *Scopus* foi em 1993, intitulado *Small wastewater treatment plants based on moving bed biofilm reactors*, em que os autores apresentaram experiências de uma estação de tratamento de efluentes de pequeno porte (4 m³/h), com utilização de reator MBBR,

e seguindo as recomendações das autoridades de controle da poluição da Noruega (ØDEGAARD *et al.*, 1993).

As eficiências de remoção de carga orgânica e fósforo foram muito acima das exigidas pelos órgãos de controle ambiental daquele país, entretanto, a remoção de nitrogênio foi limitada pela baixa quantidade de biomassa disponível para desnitrificação. Os autores destacam que para aumentar a remoção de nitrogênio deve-se reduzir o bombeamento de efluente e a quantidade de material suporte no reator anóxico deve ser aumentada (ØDEGAARD *et al.*, 1993).

Em 1994, Rusten e colaboradores demonstraram que ETEs fundamentadas em lodos ativados podem ser facilmente adaptadas à nova tecnologia, ou seja, reatores MBBR. Os resultados obtidos em uma ETE em escala real indicaram remoções de 80-90% de nitrogênio (RUSTEN *et al.*, 1994).

Nessa década o foco das pesquisas com reatores foi a remoção de carga orgânica e nitrogênio, nos efluentes domésticos, com a nova tecnologia. A adaptação dos sistemas convencionais de lodos ativados aos reatores MBBR também era foco das pesquisas.

Entretanto, com 80 citações, o trabalho de Rusten; Lars; Ødegaard (1995) intitulado *Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using Moving-Bed Biofilm Reactors* já demonstrava a preocupação com a performance dos reatores MBBR em climas frios (RUSTEN *et al.*, 1995), que foi explorada nas décadas seguintes.

5.2.2 2000-2009

Nos anos 2000 houve um aumento considerável em relação a década anterior, foram publicados 20 trabalhos. Também é nessa década que aparecem os primeiros grupos de pesquisa da China, na base de dados *Scopus*, Wang, X. *et al.* (2006) e Zhang, Y-B, *et al.* (2008).

Em 2004, a preocupação com os custos das mídias biológicas já era evidente. Neste sentido, Orantes e González-Martínez (2004) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de avaliar meio suporte alternativo e de baixo custo em reator MBBR tratando esgoto doméstico em escala piloto. Foram utilizadas seis diferentes cargas orgânicas e o material suporte do biofilme foi confeccionado de tubo de polietileno

com diâmetro interno de 1,1 cm, cortado em pedaços de 1,2 cm, cuja área superficial específica foi de $590 \text{ m}^2/\text{m}^3$, compatível com as mídias biológicas comerciais.

A aeração foi realizada por um difusor de bolhas finas. Os resultados indicaram um bom desempenho do reator MBBR, com remoção total máxima de DQO de 81%. A nitrificação foi observada apenas para cargas orgânicas com valores inferiores a $5,7 \text{ g DQO}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. O meio suporte demonstrou boa aderência do biofilme para as diferentes cargas orgânicas aplicadas. Após meses de operação o material suporte experimental não demonstrou sinais de desgaste. A quantidade de microrganismos aderida aumentou com a carga orgânica, com valor máximo de $17,3 \text{ g}/\text{m}^2$, medida como sólidos secos.

Dentre os trabalhos de maior relevância, está o de Rusten *et al.*, (2006), sendo o mais citado, com 307 ocorrências. Os autores investigaram parâmetros de projeto e operação de reatores MBBR com uso de meios suporte Kaldnes (K1). Quando adequadamente projetados e operados, os reatores de leito móvel aproveitam todo o seu volume, sem ocorrência de zonas mortas ou curto-circuito hidráulico. Os meios suportes utilizados forneceram uma área de superfície de biofilme ativo de até $350 \text{ m}^2/\text{m}^3$ de volume do reator (RUSTEN, 2006).

Outro trabalho de destaque na área, com 296 citações na base de dados Scopus, foi o de Ødegaard (2006), intitulado *Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process*. O autor demonstrou que o MBBR pode ser usado em um processo extremamente compacto de alta taxa, com tempo de detenção hidráulica menor que 1 h, para tratamento secundário de efluentes domésticos. Várias ETEs foram monitoradas neste estudo, e em três plantas norueguesas foram verificadas elevadas taxas de nitrificação ($1,2 \text{ gN-NH}_4/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) e de desnitrificação ($3,5 \text{ g N-NO}_3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) mesmo em baixas temperaturas (11°C) (ØDEGAARD, 2006).

Outros autores também demonstraram interesse no funcionamento de reatores MBBR, durante a nitrificação em baixas temperaturas. Salvetti *et al.* (2006) publicaram o artigo intitulado *Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors*. O efeito da temperatura das águas residuais na taxa de nitrificação foi estudado em dois reatores de biofilme de leito móvel, com uso de oxigênio puro, alimentados com efluente secundário de uma ETE tratando esgoto doméstico.

O primeiro Reator (R1) foi operado sob condições limitantes de amônia, enquanto o segundo Reator (R2) foi operado sob condições limitantes de oxigênio. O R1 demonstrou pouca mudança nas taxas de nitrificação em função da temperatura, enquanto o R2 mostrou uma dependência muito maior.

Os autores concluíram que, sob condições limitantes de oxigênio, a atividade específica da biomassa (a relação entre a taxa de nitrificação e a concentração de biomassa) foi fortemente influenciada pelos efeitos combinados da penetração do oxigênio através do biofilme e da temperatura do efluente.

Esta década também se destacou pelas pesquisas sobre modelagem matemática do processo de nitrificação em reatores MBBR, como os trabalhos relacionados na Tabela 11.

Tabela 11 - Trabalhos sobre modelagem matemática (2000 – 2009).

Título	Referência
<i>Modeling, identification, and validation of models for predictive ammonia control in a wastewater treatment plant - A case study</i>	Stare <i>et al.</i> (2006)
<i>Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater</i>	Plattes <i>et al.</i> (2006)
<i>Optimizing and modelling nitrogen removal in a new configuration of the moving-bed biofilm reactor process</i>	Larrea <i>et al.</i> (2007)
<i>Modelling nitrification of a lagoon effluent in moving-bed biofilm reactors</i>	Houwelig <i>et al.</i> (2007)

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

O trabalho de Plattes *et al.* (2006) teve como objetivo desenvolver um modelo de simulação dinâmica do MBBR em escala piloto, a fim de melhorar a compreensão do processo e prever seu comportamento, que auxiliava a modernização e o controle da ETE de Hesperange, Bélgica. Foi utilizado o modelo de lodo ativado (ASM1) para a cinética de crescimento do biofilme.

A idade do biofilme foi calculada de forma análoga à idade do lodo em uma planta de lodo ativado, chegando-se a valores de 2,6 e 2,1 dias no primeiro e segundo compartimento do MBBR, respectivamente, considerados pequenos em comparação às idades típicas do lodo em ETEs de lodo ativado com nitrificação.

O tratamento compreendeu duas etapas (anóxica e aeróbica) para remoção de matéria orgânica e nitrogênio. O reator aeróbio exibiu uma distribuição mais equitativa dos grupos bacterianos, e maior diversidade. O filo classificado dominante foi o *Proteobacteria*, em ambos os reatores, respondendo por mais de 80% das leituras, enquanto *Alphaproteobacteria* foi preponderante em nível de classe. No reator anóxico poucos gêneros foram observados, dentre eles, *Hyphomicrobium* (21%) foi o mais frequente (BASSIN *et al.*, 2017).

O tanque aeróbio foi dominado pelo gênero *Methylobacillus* (13%). Como esperado, nenhuma bactéria nitrificante foi detectada no biofilme anóxico. No tanque aerado, porém, as bactérias oxidadoras de amônia foram representadas pelo gênero *Nitrosomonas*, correspondendo a 2,5% de toda a população bacteriana. As oxidadoras de nitrito, *Nitrospira* e *Nitrobacter*, coexistiram no reator aeróbio (BASSIN *et al.*, 2017).

A investigação do desempenho de diferentes mídias biológicas também foi presente nessa década, a exemplo do trabalho de Chu e Wang (2011), sendo o segundo mais citado com 143 ocorrências. Sob o título *Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio*, o trabalho avaliou dois reatores com diferentes meios suportes, com vistas à remoção de matéria orgânica e nitrogênio.

No primeiro, o meio suporte era composto por partículas de polímero biodegradável policaprolactona (PCL), e no segundo espuma de poliuretano inerte (PU). Os reatores, em escala de laboratório, foram alimentados com esgoto sintético com 10 mg de NO₃/L e inoculados com lodo de uma ETE municipal. Os autores concluíram que o MBBR preenchido com meio suporte de PU apresentou bom desempenho na remoção de COT e amônia, pois numerosos microorganismos ficaram aderidos aos poros do material, o que aumenta os nitrificantes (CHU; WANG 2011).

Para os efluentes com baixa relação C/N, o MBBR preenchido com meio suporte de PCL biodegradável, apresentou boa remoção de nitrogênio total. A fonte de carbono sólido (PCL) é degradado mais lentamente que o carbono solúvel, sendo um substrato eficaz para a desnitrificação. Entretanto, dois fatores foram considerados limitantes para uso de material polimérico biodegradável: (i) o alto custo,

(ii) e a necessidade de desenvolvimento de transportadores mais porosos para aumentar a biomassa anexada (CHU; WANG 2011).

Novos materiais de meios suportes foram testados por Song *et al.* (2019), que investigaram um novo MBBR com esponjas de poliuretano à base de pó de zeólita como biocarreadores (Z-MBBR), na nitrificação e desnitrificação simultâneas (NDS), e compararam seu desempenho com um em que a mídia biológica era apenas a espuma de poliuretano (S-MBBR).

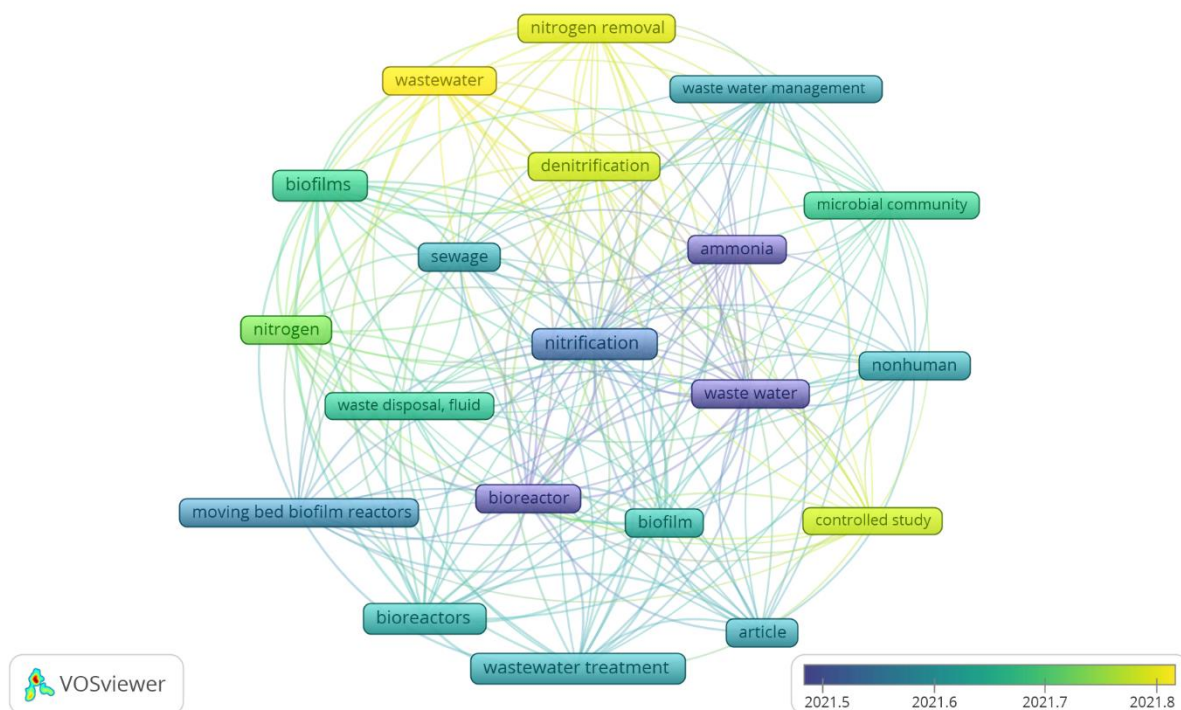
O reator Z-MBBR foi mais eficiente em relação ao S-MBBR na remoção de nitrogênio total e na NDS, pois foi detectado que a comunidade microbiana apresentou mais bactérias desnitrificantes no sistema Z-MBBR. Também foi constatada maior aderência do biofilme nas mídias biológicas do novo MBBR, ou seja, 1,3 vez maior que a dos meios suportes esponjosos (S-MBBR) (SONG *et al.*, 2019)

O artigo mais citado nessa década foi *Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design, and Performance* de Mcquarrie e Boltz, publicado em 2011, com 189 citações. Os autores sintetizaram os estudos sobre o MBBR até aquele momento, comentando sobre aplicações de processo, *design* das mídias biológicas e desempenho do reator, além de identificar carência de estudo em algumas áreas como a hidrodinâmica do biorreator, mecanismos que quantificam a emissão de gases de efeito estufa gerados no processo de remoção total do nitrogênio, entre outros (McQUARRINE; BOLTZ, 2011).

5.2.4 2020-2023

Essa década, ainda em curso, está sendo bastante produtiva. Como comentado, só em 2022 foram 37 trabalhos publicados sobre o tema. Na presente década, a seleção das 20 palavras-chave mais frequentes está indicada na Figura 14, em que se pode observar que a remoção de nitrogênio (ou desnitrificação) aparece em trabalhos mais recentes.

Figura 14 - Palavras-chave mais frequentes na década 2020 - 2023.



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Um dos temas abordados é relativo aos biofilmes com vistas ao processo de nitrificação/desnitrificação. Tratando-se da nitrificação em biorreator MBBR o artigo *Simultaneous nitrification and denitrification process using novel surface-modified suspended carriers for the treatment of real domestic wastewater* de Liu *et al.* (2020), é o mais citado com 88 citações. Os autores utilizaram meios suportes convencionais e modificados com superfície feita de granulos de polietileno, poliquatérnio-10 e óxido férrico (Fe_2O_3), ambos com área superficial variando entre 560 e 600 m^2/m^3 .

Foram utilizados dois reatores em escala de laboratório, os meios suportes modificados foram usados no reator experimental (reator1) e os convencionais utilizados no reator de controle (reator 2), ambos os reatores possuíam taxa de enchimento de 30%, temperatura entre 21°C e 23°C, disco de aeração e dispositivo agitador, e foram alimentados com águas residuárias de sistema de drenagem de uma área residencial (LIU, *et al.*, 2020). Ainda de acordo com os autores supracitados o reator 1 se mostrou mais eficiente na remoção de amônio com 98,2% em relação ao reator 2 que teve 79,3% (LIU *et al.*, 2020).

Outro trabalho com relevância com 34 citações, foi *Simultaneous nitrification and denitrification in moving bed biofilm reactor and other biological systems* de Bhattacharya; Mazumder (2021), o estudo é uma revisão bibliográfica a respeito da nitrificação-desnitrificação simultânea em MBBR.

Os autores concluíram que o MBBR é um sistema promissor para a remoção do nitrogênio por meio do processo simultâneo de nitrificação e desnitrificação (NDS), sendo o OD e a espessura do biofilme fatores determinantes para o sucesso NDS, entretanto, destacam que a taxa de cisalhamento dos meios suportes depende da velocidade do fluxo, das características da mídia biológica, dentre outros fatores (BHATTACHARYA; MAZUMDER, 2021).

O trabalho de revisão produzido por Di Capua *et al.* (2022), sob o título *Simultaneous nitrification–denitrification in biofilm systems for wastewater treatment: Key factors, potential routes, and engineered applications*, com colaboração entre Itália e Estados Unidos, faz uma revisão sobre a nitrificação e desnitrificação em estágio único, num mesmo reator, em sistemas MBBR e de lodos ativados granular, uma vez que os gradientes de oxigênio permitem o desenvolvimento de biofilmes multicamadas, incluindo bactérias nitrificantes e desnitrificantes.

As condições ambientais podem ter grande influência na performance da Nitrificação e Desnitrificação Simultâneas (NDS), como o desenvolvimento de biofilme e as vias bioquímicas. Segundo os autores, avanços recentes delinearam a possibilidade de reduzir o consumo de carbono e energia do processo e, simultaneamente, remover nitrogênio e fósforo sob condições operacionais específicas, abrindo novas possibilidades para o tratamento de efluentes (DI CAPUA *et al.*, 2022).

Os autores realizaram uma revisão crítica dos fatores que influenciam a NDS e sua aplicação em sistemas de biofilme, tanto em escala de laboratório quanto em escala real. São fornecidas estratégias operacionais para melhorar a eficiência da NDS e para reduzir a emissão de óxido nitroso e os custos operacionais (DI CAPUA *et al.*, 2022).

5.3 TENDÊNCIAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Muitos avanços ocorreram desde a concepção do primeiro reator MBBR até o que se conhece hoje. Estudos sobre modificação de biocarreadores, técnicas de aeração, hibridização do MBBR com outros tratamentos biológicos e os processos físico-químicos apresentaram desempenho promissor na remoção de matéria orgânica e nutrientes (GUPTA *et al.*, 2022).

. Embora o tratamento baseado em MBBR tenha demonstrado avanços na remoção eficaz de vários poluentes, algumas áreas podem ser exploradas:

- (i) a avaliação do ciclo de vida (ACV) pode ser utilizada como uma ferramenta eficaz de tomada de decisão para a avaliação de aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais, e assim, da sustentabilidade do processo de tratamento (GUPTA *et al.*, 2022);
- (ii) a aplicabilidade dos sistemas modificados e híbridos como uma solução sustentável numa perspectiva global.
- (iii) o desenvolvimento e a aplicação mídias biológicas modificadas mais sustentáveis e ecológicas (SHITU, 2022).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliométrica sobre a nitrificação em reator do tipo MBBR alimentados com esgoto doméstico, possibilitou a análise dessa área de estudo a partir de um perspectiva cronológica, fundamentando pelas informações da base de dados *Scopus*. Conclui-se que desde a primeira publicação, em 1993, houve um crescimento não linear em termos de trabalhos publicados. O ano de 2022 é o que possui maior número de publicações, com 37. A maior parte dos trabalhos são publicados em artigos, sendo 189 publicações desse tipo, e se enquadram na área das ciências ambientais, 194 documentos são dessa área.

Analisando os países que mais se destacam, a China é o país que mais investe em publicações sobre o tema, com 70, além de possuir o maior número de colaborações internacionais, com 16 publicações colaborativas. Ademais, os números de financiadores de pesquisa relacionadas à nitrificação em reator do tipo MBBR apontam que o país asiático lidera com 24 pesquisas financiadas pela Fundação Nacional de Ciências Naturais da China. Ainda, o Ministério da Educação lidera o número de afiliações com 12 publicações.

Apesar do protagonismo chinês, o autor com maior número de publicações é Christensson, M., da Suécia, com 11 publicações. Em relação à colaboração entre autores o grupo de pesquisa com maior publicações colaborativas, Di Capua *et al.*, é formado por italianos e americanos. Os números de registros de patentes mostram que a China não aparece entre os cinco principais nomes, o domínio dos registro é de um escritório dos Estados Unidos.

Com base nas palavras-chave geradas pelo *VOSViewer* conclui-se que houve um aumento no interesse nos estudos sobre bactérias e comunidades microbiológicas, justificado pelo aumento do interesse no processo de remoção de nutrientes.

Os eixos temáticos por década mostram que o foco das pesquisas foram mudando ao longo do tempo. Na década de 1990, os primeiros trabalhos tinham o objetivo de estudar a eficiência da remoção da carga orgânica e nitrogênio nos efluentes domésticos, e adaptação dos sistemas de lodo ativado para reatores MBBR.

O avanço nos estudos levou os pesquisadores a estudarem, na década seguinte (2000-2009), o efeito de parâmetros como temperatura, OD, DQO na

nitrificação. Além disso, começaram a surgir questionamentos sobre materiais alternativos a serem usados como meios suportes, uma vez que o preço das mídias biológicas comerciais é elevado.

Os estudos sobre meios suportes alternativos tiveram novos desdobramentos a parit de 2010. Além da diminuição de custos a melhoria da eficiência da nitrificação passou a ser objeto de estudo. Ainda, nessa década, modelos matemáticos do processo de nitrificação em MBBRs passam a ser estudados.

Por fim, na década atual a busca por diminuição dos custos dos sistemas MBBR continua, agora com foco na economia de energia. Também passou a ser estudado o processo simultâneo de nitrificação/desnitrificação, sempre com o objetivo em melhorar o processo de tratamento de efluentes.

Sugere-se que sejam avaliados materiais alternativos e de baixo custo como meio suporte para biofilmes em reatores MBBR, como tampas de garrafas PET e outros materiais, com a finalidade de nitrificação, no tratamento de efluentes domésticos.

7 REFERÊNCIAS

AHN, Y-H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: a review. **Process Biochemistry**, v.41, n.8, 1709-1721p. 2006.

ALMADA, R. B. **Avaliação de Reatores de Leito móvel com biofilme (MBBR) em série para tratamento de diferentes efluentes de refinaria de petróleo visando ao reúso industrial**. 2012. 287 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ARAUJO JUNIOR, M. M. D.; LERMONTOV, A.; ARAUJO, P. L. D. S.; ZAIAT, M. Reduction of sludge generation by the addition of support material in a cyclic activated sludge system for municipal wastewater treatment. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 483-489, set. 2013.

ARAÚJO; F.; ALVARENGA; A bibliometria na pesquisa científica da pós-graduação brasileira de 1987 a 2007. **Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação**, v.16, n.31, p.51–70, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 9.648/1986. Norma Brasileira. **Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-12.209/2011. Norma Brasileira. **Elaboração de Projetos Hidráulico-sanitários de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários**. Rio de Janeiro. 2011.

AYGUN, A.; NAS, B.; BERKTAY, A. Influence of High Organic Loading Rates on COD Removal and Sludge Production in Moving Bed Biofilm Reactor. **Environmental Engineering Science**, v.25, n.9, p. 1311-1316, nov. 2008.

BANTI, D. C.; SAMARAS, P.; CHIOTI, A. G.; MITSOPOULOS, A.; TSANGAS, M.; ZORPAS, A.; SFETSAS, T. Improvement of MBBR Performance by the Addition of 3D-Printed Biocarriers Fabricated with 13X and Bentonite. **Resources**, v.12, n.7, p. 81, 10 jul. 2023.

BARWAL, A.; CHAUDHARY, R. To study the performance of biocarriers in moving

bed biofilm reactor (MBBR) technology and kinetics of biofilm for retrofitting the existing aerobic treatment systems: a review. **Reviews In Environmental Science And Bio/Technology**, v.13, n.3, p. 285-299, 9 abr. 2014. Springer Science and Business Media LLC.

BASSIN, J.P.; RACHID, C.T.C.C.; VILELA, C.; CAO, S.M.S.; PEIXOTO, R.S.; DEZOTTI, M. Revealing the bacterial profile of an anoxic-aerobic moving-bed biofilm reactor system treating a chemical industry wastewater. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.120, p.152–160, 2017.

BHATTACHARYA, R.; MAZUMDER, D.. Simultaneous nitrification and denitrification in moving bed bioreactor and other biological systems. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 44, n. 4, p. 635-652, 2 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC.

BOLTZ, J.P.; MORGENROTH, E. Biofilms in the Water Environment: Trends and Challenges. 14-19p. **Global Trends & Challenges in Water Science, Research and Management: A compendium of hot topics and features from IWA Specialist Groups**. 2ª Ed. IWA (International Water Association), 149p. 2016.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Resolução 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. 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 5. ed. Brasília: Funasa, 2019. 545 p.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento - Snis. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (comp.). **Painel de Informações sobre Saneamento: esgotamento sanitário**. 2021.

CANLER, J.-P.; PERRET, J.-M.; CHOUBERT, J.-M. Évaluation, optimisation et modélisation de filières de traitement: cas du procédé à cultures fixées fluidisées (mbr). **Sciences Eaux & Territoires**, v.9, n.4, p. 16-23, set. 2012. Université de Bordeaux.

CANZIANI, R.; EMONDI, V.; GARAVAGLIA, M.; MALPEI, F.; PASINETTI, E.;

BUTTIGLIERI, G. Effect of oxygen concentration on biological nitrification and microbial kinetics in a cross-flow membrane bioreactor (MBR) and moving-bed biofilm reactor (MBBR) treating old landfill leachate. **Journal of Membrane Science**, v.286, n.1-2, p. 202-212, dez. 2006.

CAO, S. M. de S. **Nitrificação e desnitrificação em situações críticas de substrato**. 2018. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

CAO, S. M. de S. **Remoção Biológica de Matéria Orgânica e Nitrogênio de Efluente Industrial em Sistema de Leito Móvel com Biofilme de dois Estágios**. 2014. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CHEN, G.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M.; EKAMA, G.A.; BRDJANOVIC, D. Desenvolvimento do Tratamento de Esgoto. Cap. 1. Tradução: Marcelo Kenji Miki. **Tratamento Biológico de Esgoto: Princípios, Modelagem e Projeto**, 2ª edição. Editor da versão em português: Marcelo Kenji Miki. IWA Publishing. 2022. 973p.

CHEN, S.; LIN, J.; BLANCHETON, J-P. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. **Aquacultural Engineering**, v. 34, n. 3, p. 179-197, maio 2006.

CHU, L.; WANG, J.. Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio. **Chemosphere**, v. 83, n. 1, p. 63-68, mar. 2011.

CHUEKE, G. V.; AMATUCCI, M. O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum. **Internext**, v.10, n.2, p.1-5, 9 set. 2015. Escola Superior de Propaganda e Marketing (ESPM).

Di CAPUA, F.; IANNACONE, F.; SABBA, F.; ESPOSITO, G. Simultaneous nitrification–denitrification in biofilm systems for wastewater treatment: Key factors, potential routes, and engineered applications. **Bioresource Technology**. v.361. Oct. 2022.

ESTEVEES, F. A.; AMADO, A. M. **Nitrogênio**. Capítulo 13. In: Fundamentos de

Limnologia. Francisco de Assis Esteves (coordenador). 3ª Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 826p.

FLETCHER, M. Adherence of Marine Micro-organisms to Smooth Surfaces. In: Beachey, E.H., editor. **Bacterial Adherence**. Receptors and Recognition, vol 6. 1980.

FONSECA, D. L. **Desempenho de sistemas MBBR em diferentes condições de recheio e vazão: estudo em escala piloto e laboratorial**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia/COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GUO, X.; LI, B.; ZHAO, R.; ZHANG, J.; LIN, L.; ZHANG, G.; LI, R-H.; LIU, J.; LI, P.; LI, Y. Performance and bacterial community of moving bed biofilm reactors with various biocarriers treating primary wastewater effluent with a low organic strength and low C/N ratio. **Bioresource Technology**, v. 287, p. 121424, set. 2019.

GUPTA, B.; GUPTA, A. K.; GHOSAL, P. S.; LAL, S.; SAIDULU, D.; SRIVASTAVA, A.; UPADHYAY, M. Recent advances in application of moving bed biofilm reactor for wastewater treatment: Insights into critical operational parameters, modifications, field-scale performance, and sustainable aspects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.10, n.3, 2022.

HARRISON J. A., 2003. The nitrogen cycle of microbes and men. In: Vision Learning. Disponível em http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=98 Acesso em 01.07.223.

HENZE, Mogens; KRISTENSEN, Gert Holm; STRUBE, Rune. Rate-Capacity Characterization of Wastewater for Nutrient Removal Processes. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 29, n. 7, p. 101-107, 1 abr. 1994. IWA Publishing.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 940 p.

LEIKNES, T.; ØDEGAARD, H. Moving Bed Biofilm Membrane Reactor (MBB-M-R): Characteristics and Potentials of a Hybrid Process Design for Compact Wastewater Treatment Plants, Proceedings. **Engineering with Membranes**, 2001.

LIU, T.; HE, X.; JIA, G.; XU, J.; QUAN, X.; YOU, S. Simultaneous nitrification and denitrification process using novel surface-modified suspended carriers for the treatment of real domestic wastewater. **Chemosphere**, v. 247, p. 125831, maio 2020.

LÖBLER, M. L.; LEHNHART, E. R.; TAGLIAPIETRA, R. D.; TONTINI, J. Evolução bibliométrica: uma análise dos trabalhos publicados nos eventos da AnPAD. **Revista Sociais E Humanas**, v.32, n.3. 2019.

McQUARRIE, J. P.; BOLTZ, J. P. Moving Bed Biofilm Reactor Technology: process applications, design, and performance. **Water Environment Research**, v. 83, n. 6, p. 560-575, jun. 2011. Wiley.

MELCHIORS, E. **Avaliação do desenvolvimento de biofilme em meio suporte esponjoso em reator biológico de leito móvel (MBBR) no tratamento de efluente de indústria de celulose**. 2019. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias e Processos Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

METCALF & EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2016. 1980 p. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa.

MOTA, F. S .B.; VON SPERLING, M. (org.). **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 428 p. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB).

ØDEGAARD, H. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process. **Water Science And Technology**, v. 53, n. 9, p. 17-33, 1 abr. 2006. IWA Publishing.

ØDEGAARD, H.; GISVOLD, B.; STRICKLAND, J. The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 4-5 p. 383-391, 2000.

ØDEGAARD, H.; RUSTEN, B.; BADIN, H. Small Wastewater Treatment Plants Based on Moving Bed Biofilm Reactors. **Water Science And Technology**, v.28, n.10, p. 351-359, 1 nov. 1993. IWA Publishing.

ØDEGAARD, H.; RUSTEN, B.; WESSMAN, F. State of the Art In Europe of the Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Process. **Proceedings of the Water Environment Federation**, v. 2004, n. 16, p. 348-354, 1 jan. 2004. Water Environment Federation.

OKUBO, Y. Bibliometric Indicators and Analysis of Research Systems: Methods and Examples. **OECD Science, Technology and Industry Working Papers**, n.1997/01, OECD Publishing, Paris. 1997.

OLIVEIRA, D. V. M. **Caracterização dos Parâmetros de Controle e Avaliação de Desempenho de um Reator Biológico com Leito Móvel (MBBR)**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

OLIVEIRA, D. V. M. de. **Avaliação da Remoção de Nitrogênio Via Nitrificação e Desnitrificação Simultânea em um Reator Biológico com Leito Móvel (IFAS)**. 2015. 11 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

ORANTES, J.C.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S. A new low-cost biofilm carrier for the treatment of municipal wastewater in a moving bed reactor. **Water Science And Technology**, v. 48, n. 11-12, p. 243-250, 1 dez. 2004. IWA Publishing.

PLATTES, M.; HENRY, E.; SCHOSSELER, P.M.; WEIDENHAUPT, A. Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, v. 32, n. 2, p. 61-68, nov. 2006.

PRITCHARD, A. Statistical Bibliography or Bibliometrics?. *Journal of Documentation*. v.24, n. 4348-349, 1969.

REIS, G. G. dos. **Influência da carga orgânica no desempenho de reatores de leito móvel com biofilme (MBBR)**. 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Publicada no Diário Oficial nº 92 em 16 de maio de 2011. Composição e classificação dos esgotos sanitários.

REVSBECH, N. P.; RISGAARD-PETERSEN, N.; SCHRAMM, A.; NIELSEN, L. P. Nitrogen transformations in stratified aquatic microbial ecosystems. *Antonie van Leeuwenhoek*, [S.L.], v. 90, n. 4, p. 361-375, 11 out. 2006. Springer Science and Business Media LLC

RUSTEN, B., LARS J. H. E ØDEGAARD, H. Nitrogen Removal from Dilute Wastewater in Cold Climate Using Moving-Bed Biofilm Reactors. **Water Environment Research**, v.67, n.1. Jan/Feb., 1995, p. 65-74.

RUSTEN, B.; EIKEBROKK, B.; ULGENES, Y.; LYGREN, E. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. **Aquacultural Engineering**, v.34, n.3, p. 322-331, maio 2006.

RUSTEN, B.; HEM L.J.; ØDEGAARD, H. Nitrogen Removal from Dilute Wastewater in Cold Climate Using Moving-Bed Biofilm Reactors. **Water Environment Research**, v. 67, n. 1, p. 65-74, jan. 1995. Wiley.

RUSTEN, B.; SILJUDALEN, J. G.; NORDEIDET, B. Upgrading to nitrogen removal with the kmt moving bed biofilm process. **Water Science And Technology**, v. 29, n. 12, p. 185-195, 1 dez. 1994. IWA Publishing.

SALVETTI, R.; AZZELLINO, A.; CANZIANI, R.; BONOMO, L. Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors. **Water Research**, v.40, n.15, p. 2981-2993, ago. 2006.

SCHEEREN, M. B.; KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DRESSLER, V. L. O processo ANAMMOX como alternativa para tratamento de águas residuárias, contendo alta concentração de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.15, n.12, p.1289–1297, 2011.

SCHMIDT, I.; SLIEKERS, O.; SCHMID, M.; BOCK, E.; FUERST, J.; KUENEN, J. G.; JETTEN, M. S.M.; STROUS, M. New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. **FMES Microbiology Reviews**, v.27, n.4, p. 481-492, out. 2003. Oxford University Press (OUP).

SEHAR, S.; NAZ, I. Role of the Biofilms in Wastewater Treatment. Cap. 7. In: **Microbial Biofilms: Importance and Applications**. Dhanasekaran D, Thajuddin N, editors. InTech. 2016.

SHITU, A.; GANG LIU, G.; MUHAMMAD, A. I.; ZHANG, Y.; TADDA, M.A.; QI, W.; LIU, D.; YE, Z.; ZHU, S. Recent advances in application of moving bed bioreactors for wastewater treatment from recirculating aquaculture systems: A review, **Aquaculture and Fisheries**, v.7, n.3, p.244-258, 2022.

SIAAP. L'assainissement des eaux usées en agglomérations parisiennes: principes et procédés. **Sciences et Techniques**. Livret Pédagogique. Colombes: SIAAP-La cité de l'Eau et de l'Assainissement – Service Médiation Pédagogique, 2013.

SOARES, S. V.; PICOLLI, I. R. A.; CASAGRANDE, J. L. Pesquisa Bibliográfica, Pesquisa Bibliométrica, Artigo de Revisão e Ensaio Teórico em Administração e Contabilidade. **Administração: Ensino e Pesquisa**, v.19, n.2, p. 308-339, 1 maio 2018. ANGRAD.

SONG, Z.; ZHANG, X.; NGO, H. H.; GUO, W.; SONG, P.; ZHANG, Y.; WEN, H.; GUO, J. Zeolite powder based polyurethane sponges as biocarriers in moving bed biofilm reactor for improving nitrogen removal of municipal wastewater. **Science Of The Total Environment**, v. 651, p. 1078-1086, fev. 2019.

SOUZA, C. L. de; SANTOS, A. B. dos; SILVA, M. E. R.; AQUINO, S. F. de. Aspectos qualitativos de correntes de esgotos segregadas e não segregadas. **Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais**. Fortaleza: Gráfica e Editora Imprece, 2019. p. 118-218.

STARE, A.; HVALA, M.; VRECKO, D. Modeling, Identification, and Validation of Models for Predictive Ammonia Control in a Wastewater Treatment Plant—A Case Study. **ISA Transactions**. v.42, n.2, p.159-174, 2006.

VOLCKE, E.I.P.; SOLON, K.; COMEAU, Y.; HENZE, M. Características das águas residuárias. Cap. 3. Tradução: Dione Mari Morita. **Tratamento Biológico de Esgoto: Princípios, Modelagem e Projeto**, 2ª edição. Editor da versão em português: Marcelo Kenji Miki. IWA Publishing. 2022. 973p.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3ª edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 2005.452p.

VON SPERLING, M. **Biological Wastewater Treatment Series**. Basic Principles of Wastewater Treatment. Department of Sanitary and Environmental Engineering Federal University of Minas Gerais, Brazil, v.2, IWA Publishing. 2007b. 195p.

VON SPERLING, M. **Biological Wastewater Treatment Series**: Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. Department of Sanitary and Environmental Engineering Federal University of Minas Gerais, Brazil (Vol.1), IWA Publishing. 2007a, 291p.

WANG X.J.; XIA, S.Q., CHEN, L.; ZHAO, J.F.; RENAULT, N.J., CHOVELON J.M. Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor, **Process Biochemistry**, v.41, n.4, p. 824-828. **2006**.

WIESMANN, U., CHOI, I.S. E DOMBROWSKI, E.M., 2007, *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment*. 1º ed., Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmGH & Co KGaA.

WOLFF, D. B.; PAUL, E.; COSTA, R. H. R. da. Influência do tipo de material suporte no desempenho de reatores biológicos de leito móvel na remoção de carbono e nitrificação de esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 149-154, jun. 2010.

XIONG, J.; ZHENG, Z.; YANG, X.; HE, J.; LUO, X.; GAO, B. Mature landfill leachate treatment by the MBBR inoculated with biocarriers from a municipal wastewater treatment plant. **Process Safety And Environmental Protection**, v.119, p.304-310, out. 2018.

ZHANG, C.; ZHU, Y.; LI, W.; ZHANG, Q. Low-carbon and high-ammonia nitrogen dispersed wastewater treatment: from normal-sludge to low-sludge to no-sludge modes. **Environmental Research**, v.233, p.116498, set. 2023.