



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL**  
**CAMPUS A. C. SIMÕES**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC**



**ELDER DE OLIVEIRA SANTANA**

**Potencialidade da utilização de tampinhas de garrafas em PEAD como meio suporte de  
biomassa de reatores MBBR tratando esgoto sanitário**

Maceió

2023

ELDER DE OLIVEIRA SANTANA

**Potencialidade da utilização de tampinhas de garrafas em PEAD como meio suporte de biomassa de reatores MBBR tratando esgoto sanitário**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do 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.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Gomes Barboza  
Coorientadora: Profa. Dra. Ivete Vasconcelos  
Lopes Ferreira

Maceió  
2023

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S232p Santana, Elder de Oliveira.

Potencialidade da utilização de tampinhas de garrafas em PEAD como meio suporte de biomassa de reatores MBBR tratando esgoto sanitário / Elder de Oliveira Santana. – Maceió, 2023.

34 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientador: Márcio Gomes Barboza.

Co-orientadora: Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira.

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

Bibliografia: f. 31-34.

1. Tratamento com mídias alternativas. 2. Reatores de Biofilme de Leito Móvel.  
3. Mídias biológicas. I. Título.

CDU: 628.32/.35

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelo apoio durante toda a minha jornada acadêmica, especialmente à minha mãe Valkiria Leite e minha avó Maria José de Santana. Sempre procurei trilhar com honra o caminho que vocês me apontaram. Agradeço imensamente pelo esforço que sempre fizeram pela minha educação, pois eu não seria o primeiro engenheiro da família sem que vocês tivessem aberto esse caminho. Agradeço também ao meu primo Samuel Vitor dos Santos por ser um exemplo para mim e mostrar os lugares que podemos alcançar com dedicação e esforço.

A toda minha ancestralidade que sempre me deu forças e ajuda para seguir em frente, apesar dos desafios que encontrei pelo caminho.

Aos meus queridos amigos que me apoiam, torcem e aguentam as minhas reclamações desde o ensino fundamental: Marcelo Gomes e Maria Letícia Santos. Às amigas que construí dentro da UFAL, a todo pessoal do “Na Maciota” especialmente ao André Moraes e Pedro Vinicius da Silva. Agradeço também à Beatriz Marques pela parceria, conselhos e fé (?) nesse trabalho que desenvolvemos em conjunto.

Agradeço à Deborah Victória Santos pela cumplicidade durante esses últimos anos da graduação e ser um ponto de apoio que eu poderia contar a qualquer hora. Gostaria de agradecer à Anny Karoline Gonçalves por sempre manter a calma e controle das situações quando elas não saíam do jeito planejado e por sempre me lembrar que sempre há luz no fim do túnel e ao Arthur Diegues por compartilhar seus conhecimentos em biologia e ser exemplo de determinação (e de acidez também hahaha). A graduação sem vocês não seria a mesma coisa.

Ao professor Márcio Barboza que aceitou o convite para orientação do desenvolvimento desta etapa tão importante que é o TCC e a professora Ivete Ferreira pela co-orientação, disponibilidade e toda ajuda durante essa jornada.

Agradeço a cada um que, de alguma forma, contribuiu para a minha formação, o profissional que serei, em partes, é resultado dessas contribuições.

## RESUMO

Um dos pilares da utilização dos Reatores de Biofilme de Leito Móvel (MBBR) é a utilização de material suporte para a imobilização de biomassa microbiana. Entretanto as mídias biológicas convencionais disponíveis comercialmente possuem alto custo. Assim, a utilização de biomídias de baixo custo nesses reatores emerge como uma expectativa promissora para a ampla disseminação dessa tecnologia. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a potencialidade das tampas de garrafas em PEAD como material suporte alternativo para aderência de microrganismos em reator MBBR. Nesse contexto, foi realizada a caracterização das tampinhas de garrafa em PEAD e um levantamento de dados com base na literatura. Com auxílio de um paquímetro obteve-se as dimensões das tampinhas de garrafa como altura, espessura, diâmetro interno e externo. Além disso, utilizou-se duas provetas de um litro para a obtenção do volume e uma balança analítica para obtenção das massas das tampinhas. Para a obtenção dos dados das características das mídias utilizadas na literatura, utilizou-se a base de dados da *Scopus*, realizando uma pesquisa com descritores sobre o tema de interesse e aplicação de operadores booleanos. Obteve-se como resultado da caracterização das tampinhas um diâmetro interno de 2,8 cm, volume de 2,3 cm<sup>3</sup>, densidade de 0,9 g/cm<sup>3</sup> e área superficial específica de 678 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Adicionalmente, como resultado do levantamento de dados de mídias biológicas, construiu-se uma tabela com as características das biomídias dos trabalhos selecionados como compatíveis com o tema. Também foi realizada uma comparação entre as tampinhas e os dados levantados onde foi possível compreender que as tampinhas de garrafa são boas candidatas à substituição de baixo custo das mídias biológicas convencionais.

**Palavras-chave:** Tratamento com mídias alternativas; Reator MBBR; Mídias biológicas.

## ABSTRACT

One of the pillars of Mobile Bed Biofilm Reactor (MBBR) utilization is the use of support material for the immobilization of microbial biomass. However, commercially available conventional biological media are costly. Thus, the use of low-cost bio-media in these reactors emerges as a promising expectation for the widespread adoption of this technology. In this context, the present study aims to evaluate the potential of HDPE bottle caps as an alternative support material for microorganism adhesion in an MBBR reactor. In this context, HDPE bottle caps were characterized, and data were gathered from the literature. Using a caliper, the dimensions of the bottle caps, such as height, thickness, internal and external diameter, were obtained. Additionally, two one-liter graduated cylinders were used to measure the volume, and an analytical balance was used to determine the masses of the bottle caps. To obtain data on the characteristics of media used in the literature, the *Scopus* database was used, conducting a search with descriptors related to the topic of interest and applying Boolean operators. The characterization of the bottle caps resulted in an internal diameter of 2.8 cm, a volume of 2.3 cm<sup>3</sup>, a density of 0.9 g/cm<sup>3</sup>, and a specific surface area of 678 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Furthermore, as a result of the data survey on biological media, a table was created with the characteristics of bio-media from selected works that were compatible with the topic. A comparison was also made between the bottle caps and the collected data, revealing that bottle caps are good, low-cost candidates for replacing conventional biological media.

**Keywords:** Treatment with alternative biocarriers; MBBR; Biocarrier.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Condições de operação.....	13
Figura 2: Esquematização do biofilme. ....	18
Figura 3: Esquematização da metodologia utilizada. ....	20
Figura 4: Vistas da tampinha. ....	21
Figura 5: Determinação do volume das tampinhas. ....	21
Figura 6: Pesagem das tampinhas.....	22
Figura 7: Quantidade de publicações por autor. ....	25
Figura 8: Quantidade de publicações por ano. ....	25
Figura 9: Gráfico do número de publicações por área do conhecimento. ....	26
Figura 10: Gráfico do número de publicações por País.....	26

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Informações sobre as características das mídias biológicas utilizadas em reatores MBBR.....	16
Tabela 2: Dimensões obtidas das tampinhas de garrafa.....	24
Tabela 3: Propriedades das tampinhas.....	24
Tabela 4: Dados de mídias biológicas disponíveis na literatura.....	31

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
3.1	TRATAMENTO AERÓBIO DE ESGOTO.....	12
3.2	REATOR DE BIOFILME DE LEITO MÓVEL (MBBR).....	13
3.3	MEIO SUPORTE .....	15
3.3.1	Tampinhas de garrafa como meio suporte .....	17
3.4	FORMAÇÃO DO BIOFILME .....	17
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MEIO SUPORTE .....	20
4.2	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA.....	23
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>24</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SUPORTE.....	24
5.2	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE MÍDIAS BIOLÓGICAS .....	24
5.3	REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE MÍDIAS BIOLÓGICAS .....	27
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TAMPINHAS E AS MÍDIAS DA LITERATURA .....	31
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>34</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os reatores de biofilme de leito móvel (MBBR) têm sido amplamente aplicados no tratamento biológico de águas residuárias urbanas e industriais nas últimas décadas. Os suportes de plástico, conhecidos como mídias biológicas, são o principal componente do MBBR (Calderón *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2018; Sonwani *et al.*, 2019). De acordo com Barwal e Chaudhary (2014), as mídias biológicas aumentam a produtividade do tratamento fornecendo área superficial ativa para que haja fixação das bactérias.

A mídia biológica desenvolvida originalmente e mais usada para esse tipo de reator é a AnoxKaldnes da série K, feita de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) (Ødegaard, 2006). Porém, devido ao alto custo desse material, os pesquisadores se debruçaram a estudar e buscar diversas alternativas entre formas e materiais. Liu *et al.* (2019) utilizaram mídias biológicas de polipropileno para tratar águas residuárias contaminadas com ácido tereftálico e Bakar *et al.* (2020) buscaram avaliar o desempenho de um reator em escala de laboratório tratando efluente de óleo de palma utilizando diversos tipos de materiais suportes e tempos de detenção hidráulica.

No entanto, Al-Amshawee *et al.* (2020) ressaltam que para a seleção de uma boa mídia biológica as opções devem ser criticamente analisadas, pois determina o custo-benefício do processo, além da sustentabilidade do biofilme e o desempenho do tratamento. Nesta perspectiva, a busca por mídias biológicas de baixo custo emerge como uma alternativa altamente pertinente para a disseminação da tecnologia em questão, que tem se revelado vantajosa ao longo dos últimos anos

Dessa forma, conforme ressaltado por Di Biase (2019), atualmente é crucial a necessidade de atualizar as estações de tratamento de águas residuais existentes com poucos custos adicionais (por exemplo, mídias biológicas e peneiras) para aumentar a capacidade volumétrica devido ao aumento da população.

Por conseguinte, neste trabalho almeja-se estudar a viabilidade da utilização das tampinhas de garrafas fabricadas em PEAD como um meio suporte alternativo às mídias biológicas convencionais, com a expectativa de que estas desempenhem satisfatoriamente o mesmo papel, porém com uma significativa redução dos custos. Isso devido ao fato de que as tampinhas são resíduos e estão abundantemente disponíveis. Essas características consolidam ainda mais a importância das pesquisas por mídias biológicas de baixo custo para a disseminação eficaz da tecnologia mencionada.

## **2 OBJETIVOS**

Nesta seção serão apresentados os objetivos que se pretende alcançar com a realização desta pesquisa.

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar a potencialidade das tampas de garrafas em PEAD como material suporte alternativo para aderência de microrganismos em reator MBBR.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como forma de alcançar o objetivo geral, sugerem-se os seguintes objetivos específicos:

- i) Caracterizar as tampinhas de garrafa em PEAD;
- ii) Realizar um levantamento teórico e bibliométrico das informações disponíveis sobre as mídias biológicas convencionais na literatura;
- iii) Comparar as características das tampinhas de garrafa em PEAD e das mídias biológicas convencionais.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado o alicerce teórico deste trabalho. Para transmitir claramente as informações produzidas nesta área do conhecimento, consistirá em uma síntese da literatura dos conteúdos de interesse.

#### 3.1 TRATAMENTO AERÓBIO DE ESGOTO

Existe hoje uma grande preocupação em relação ao grau de tratamento e ao destino final dos esgotos, as suas consequências sobre o meio ambiente, à qualidade das águas e seus usos benéficos (Jordão; Pessôa, 2005).

Os esgotos domésticos são compostos por 99,9% de água. A fração restante é a responsável pelo potencial poluidor desses efluentes, as quais incluem-se sólidos orgânicos e inorgânicos, suspenso e dissolvidos, além de micro-organismos e nutrientes (Von Sperling, 2016). Assim, graças a essa pequena parcela, torna-se necessário o tratamento dessas águas residuais, as quais, sem o devido cuidado, podem acarretar a proliferação de doenças, eutrofização do corpo receptor e outras graves consequências (Jordão; Pessôa, 2005).

O tratamento aeróbio emprega microrganismos que consomem oxigênio para transformar a matéria orgânica em produtos não reativos (inertes). A base desse processo é o contato efetivo entre esses microrganismos e o material orgânico contido no líquido, possibilitando que a matéria orgânica seja utilizada como fonte de energia pelos microrganismos (Cornelli *et al.* 2015). A oxidação e a estabilização da matéria orgânica são efetuadas biologicamente utilizando uma grande variedade de microrganismos, principalmente bactérias, chamadas de bactérias heterotróficas (Zilli, 2013).

Os processos principais utilizados para o tratamento de esgoto podem ser divididos em duas categorias principais: processos com crescimento suspensos e processos com crescimento aderido, ou biofilme (Metcalf; Eddy; 2016).

Incluem-se nos processos com biomassa em suspensão as diversas variantes dos lodos ativados, como os sistemas de lodos ativados com poços profundos, os reatores biológicos em bateladas sequenciais e os biorreatores com membranas (Fujii, 2011).

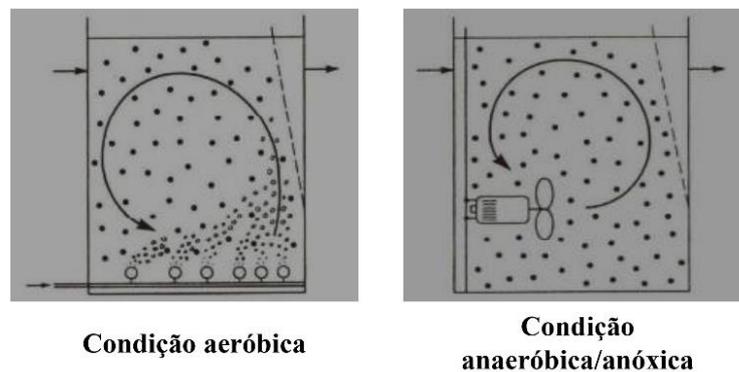
Em processos de crescimento aderido, os microrganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica ou de nutrientes estão aderidos em um meio material inerte. O material orgânico e os nutrientes são removidos devido à passagem do esgoto pelo biofilme (Metcalf; Eddy; 2016).

### 3.2 REATOR DE BIOFILME DE LEITO MÓVEL (MBBR)

Segundo Ødegaard e Rusten (2004), o reator de biofilme de leito móvel foi desenvolvido na Noruega no final dos anos 1980 e início dos anos 1990, de modo que as características do processo de lodos ativados, bem como as do processo de biofiltro fossem unidas sem incluir as piores características dessas tecnologias.

Ao contrário de outros reatores de biofilme, o MBBR utiliza todo o volume do tanque para crescimento de biomassa (Rusten *et al.*, 2005). Isso é alcançado fazendo com que a biomassa cresça em transportadores que estão suspensos no reator e se movendo livremente através das correntes configuradas por aeração (em reatores aeróbios) ou mecanismos de mistura (em reatores anóxicos) (Figura 1), sendo esses transportadores mantidos dentro do reator por um arranjo de peneiras na sua saída a fim retê-los e permitir que o efluente tratado flua para a próxima etapa de tratamento. (McQuarrie; Boltz, 2011; Ødegaard, 2017).

Figura 1: Condições de operação.



Fonte: Modificado de Ødegaard e Rusten (2004).

Uma das principais vantagens deste processo é que grandes quantidades de biomassa podem aderir aos meios de suporte, aumentando a capacidade volumétrica da estação de tratamento (Ødegaard, 2004). Ademais, conforme destacado por Oliveira e Santos (2018), dentre as principais vantagens da implementação de reatores MBBR, encontram-se: a obtenção de sistemas compactos e robustos aos picos de cargas orgânicas e hidráulicas e às variações de pH e temperatura; a possibilidade de supressão da operação de recirculação do lodo; menor custo de investimento devido ao menor volume do reator aeróbio; e a possibilidade de aplicação como solução para *upgrade* de ETE existente.

Essa tecnologia pode ter como objetivo a remoção de matéria orgânica carbonácea e a nitrificação, e de acordo com configurações específicas, a desnitrificação e a remoção de fósforo (De Oliveira, 2008). A remoção de matéria orgânica e nutrientes no MBBR é influenciada por vários parâmetros, como tempo de detenção hidráulica (TDH), taxa de

preenchimento com mídia biológica, espessura do biofilme, Oxigênio Dissolvido, pH, temperatura, configuração do reator, tipo de microrganismo, etc. (ABDELFATTAH; HOSSAIN; CHENG; 2020).

Vários pesquisadores se propuseram a utilizar essa tecnologia para tratar os mais diversos tipos de efluentes, nesse contexto é válido ressaltar os resultados disponíveis na literatura das aplicações dessa tecnologia.

Pinto (2018) avaliou a eficiência do reator MBBR para o tratamento de efluente de um complexo industrial visando a remoção da matéria orgânica e nitrogênio amoniacal. A autora utilizou durante a sua pesquisa as mídias biológicas do tipo K1, com fração de enchimento de 50% e tempo de detenção hidráulica de 6 horas, obtendo uma remoção média de DQO no MBBR de 83% e de 95% para o Nitrogênio Amoniacal.

Souza (2019) avaliou o desempenho de um reator biológico com leito móvel (MBBR) como pós-tratamento de sistema anaeróbio. O sistema de bancada funcionou durante 152 dias, e era composto por dois reatores MBBR que operaram com diferentes configurações, com 2 e 4 horas de tempo de detenção hidráulica e com 50 e 70% de enchimento com meio suporte. Os reatores foram alimentados com efluente sintético com concentração de DQO afluente média de 200 mg/L e oxigênio dissolvido mantido próximo a 2,0 mg/L. A eficiência média de remoção de DQO variou de 66,7% a 75,9%.

Sodhi *et al.* (2021) investigaram a minimização de lodo, a remoção de poluentes e nitrogênio no tratamento de águas residuárias de curtume. O período experimental foi de 240 dias e apresentou eficiência de DQO total de até 93,5%, Nitrogênio Amoniacal de 95,2% e minimização geral de lodo de 46,8% em comparação com o tratamento convencional por lodos ativados.

Viana (2022) realizou uma avaliação do tratamento de águas residuárias de um laticínio em reatores MBBR objetivando a eficiência de remoção de matéria orgânica conseguindo uma eficiência de remoção de DQO de 98%. O experimento foi conduzido com um tempo de detenção hidráulica médio de 14 horas, vazão de entrada de aproximadamente de 13,5 m<sup>3</sup>/h, o sistema foi preenchido com 60% de mídias biológicas do tipo BWT-X com área superficial específica de 650 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> fabricadas em Polietileno de Alta Densidade (PEAD).

### 3.3 MEIO SUPORTE

No MBBR, o tipo de mídia biológica, sua forma, área superficial e taxa de preenchimento são os principais parâmetros que determinam a eficiência e o desempenho do tratamento de águas residuais (Garcia *et al.*, 2008). Segundo Jagaba *et al.* (2021) é muito importante estudar e entender as propriedades de diferentes materiais antes de adotá-los como elementos de suporte em um biorreator, pois é crucial para a eficiência do tratamento.

As mídias biológicas usadas para adsorção de biomassa microbiana devem ser tão grandes quanto possível com alta porosidade para fornecer uma área de contato efetiva para fixação dessa biomassa (Alamshawee, 2020). A NBR 12.209/2011 aponta que a densidade do meio suporte deve ser entre 0,92 e 0,98 e a superfície específica interna superior a  $250 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ , sendo essa a relação entre a área superficial interna do material suporte e o seu volume aparente (ABNT, 2011).

As diferentes configurações dos meios suporte resultam em diferentes áreas de contato, as quais podem ainda apresentar maior ou menor potencial para aderência de biomassa em função do arranjo e desenho geométrico da peça, podendo acarretar assim em uma maior ou menor eficiência de tratamento (Oliveira e Santos, 2018).

Além da área superficial outro parâmetro importante a ser analisado é a fração de enchimento. A quantidade de suportes é conhecida como fração de recheio (FR) (ou de enchimento), definida pela razão do volume ocupado pelas mídias, consideradas como blocos sólidos, e o volume total do reator (Salvetti *et al.*, 2006). Segundo Andreottola *et al.* (2000) apenas 50-70% do tanque deve ser preenchido por mídias biológicas. E em comparação com outros sistemas de biomassa fixa (filtros biológicos e biofiltros submersos), esses sistemas não apresentam problemas de colmatação e menor perda de carga.

A literatura aponta que existem diferentes tipos de mídias biológicas disponíveis com diferentes formas e tamanhos feitas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polipropileno (PP), Polietileno (PE), poliestireno (PS) e cloreto de polivinila (PVC). Segundo Zhao *et al.* (2019) uma das desvantagens da utilização de materiais orgânicos inertes é a baixa bioafinidade e hidrofobicidade. Além disso, Freitas *et al.* (2019) relatam que, os meios suportes comerciais possuem custo muito elevado: a partir de R\$ 3700,00 por metro cúbico naquele ano.

Mao *et al.* (2017) apontam que materiais como PP, PE e PEAD, possuem a superfície carregada eletronegativamente assim como a carga superficial das bactérias, o que pode dificultar a adesão. Na Tabela 1 estão indicadas as características de algumas mídias biológicas comerciais.

Tabela 1: Informações sobre as características das mídias biológicas utilizadas em reatores MBBR.

<b>Autor</b>	<b>Modelo</b>	<b>Material</b>	<b>Formato</b>	<b>Área Superficial Específica</b>
Bakar <i>et al.</i> (2020)	BPM	Polipropileno	Cilíndrico	450 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	HEX	Polietileno	Cilíndrico	320 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Odegaard, (2004)	K1	Polietileno de Alta Densidade	Cilíndrico	500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	K2	Polietileno de Alta Densidade	Cilíndrico	350 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	K3	Polietileno de Alta Densidade	Cilíndrico	500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Das e Naga (2011) apud Barwal e Chaudhary (2014)	NATRIX C2	Polietileno de Alta Densidade	-	220 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	NATRIX M2	Polietileno de Alta Densidade	-	200 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	Biofilm-Chip M	Polietileno de Alta Densidade	-	1200 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	Biofilm-Chip P	Polietileno de Alta Densidade	-	900 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Barwal e Chaudhary (2017)	-	Poliestireno de baixo custo	Elipsoide	380 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Oliveira (2019)	B&F PE03	Polietileno de Alta Densidade	Cilíndrico	1000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>

Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Chu *et al.* (2014) relataram que o material da mídia biológica influencia o crescimento e a distribuição do biofilme. Diante disso, pesquisas vêm sendo realizadas com mídias biológicas alternativas a fim de reduzir os custos sem perder a eficiência do processo (Daniel, 2019; Song *et al.* 2019).

Barwal e Chaudhary (2017) buscaram avaliar a possibilidade da utilização de uma mídia biológica constituída de poliestireno de baixo custo como alternativa às mídias biológicas convencionais. Para a realização do experimento utilizou efluente sanitário sintético, com vazão contínua e tempo de detenção de 20 horas. Além disso, as mídias biológicas utilizadas possuíam área superficial específica de 380 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

Bakar *et al.* (2020) buscaram utilizar dois tipos de mídias biológicas (BPM, feita em polipropileno e HEX, feita em polietileno) para tratar efluente de óleo de palma em reatores MBBR. Durante o experimento os reatores com os meios suportes foram aclimatados com amostra do efluente e de lodo, com tempo de detenção de 24 horas durante 28 dias e DQO média de 3000 mg/L, alcançando uma remoção de DQO de 80-90%.

Freitas (2019) utilizou flocos de polietileno de alta densidade (PEAD) reciclável como meio suporte em reator MBBR tratando esgoto sanitário. O meio suporte utilizado possuía 1000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de área superficial, a fração de enchimento com meio suporte foi de 50% e tempo de detenção hidráulica de 2 horas.

Song *et al.* (2019) desenvolveram uma nova mídia biológica para reatores MBBR com esponjas de poliuretano a base de pó de zeólita com o objetivo de aumentar a remoção de nitrogênio. O reator com efluente sintético foi preenchido com 10% de mídia biológica, operado sob vazão contínua em um tempo de detenção hidráulica de 12 horas.

Garcia, McLee e Schuler (2022) estudaram o efeito do comprimento do meio suporte na formação do biofilme em reatores MBBR utilizando mídias tubulares personalizadas feitas em polietileno de alta densidade com diferentes comprimentos.

### 3.3.1 Tampinhas de garrafa como meio suporte

Belloni (2011) utilizou tampinhas de garrafa para avaliar o pós-tratamento de Reatores anaeróbios de leito fluidizado (RALF) em um Filtro Biológico Aerado Submerso (FBAS), com o intuito de verificar o desempenho dessas tampas como meio suporte para o crescimento do biofilme bacteriano e a sua eficácia na remoção de matéria orgânica e sólidos dos esgotos sanitários.

Durante a execução do experimento, Belloni (2011) confeccionou um FBAS com volume útil de 583 L e um Decantador Secundário de 1,56 m<sup>3</sup>. Na parte inferior do reator foi instalada a 30 cm do fundo uma grade feita em acrílico para fixar o material. A altura total do leito fixo foi de 1,53m, ocupando com enchimento um volume de 483 litros. As tampinhas foram divididas em duas metades para o enchimento do reator, ao total foram utilizadas 84.267 metades de tampas. O sistema alcançou eficiências de remoção para DQO de 47% e 53% e para DBO de 51% e 52%, respectivamente.

## 3.4 FORMAÇÃO DO BIOFILME

Nos processos de tratamento com crescimento aderido, um biofilme, constituído de microrganismo, material particulado e polímeros extracelulares se aderem e cobrem o material suporte, que pode ser plástico, pedras ou outro material (Metcalf; Eddy; 2016)

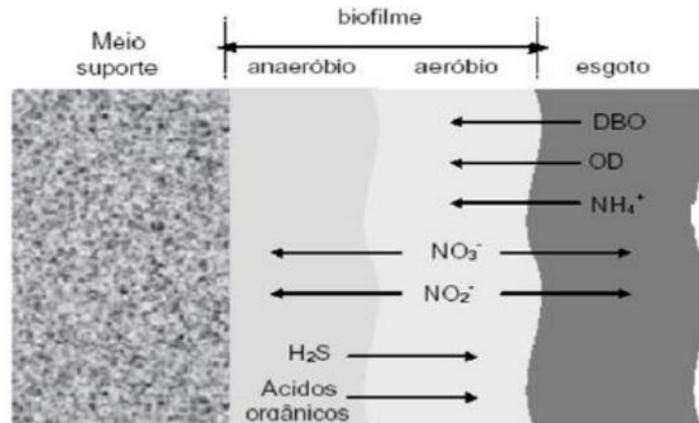
Wolff, Paul e Costa (2010) relatam que a formação do biofilme é um processo dinâmico que envolve uma série de eventos moleculares que incluem mecanismos para adesão, agregação e expansão da comunidade microbiana.

Segundo Dias *et al.* (2018) e Huang *et al.* (2018), a formação do biofilme ocorre após a adesão inicial de macromoléculas à superfície da mídia biológica, criando condições para a colonização de células bacterianas, gerando o acúmulo de bactérias e produção de substâncias poliméricas extracelulares (EPS). As EPSs fornecem a "cola" para associações celulares na matriz de flocos de lodo ativado, biofilmes e grânulos (Chen *et al.* 2022). A EPS adsorve e armazena os diferentes constituintes, como matéria orgânica, nutrientes e oxigênio necessários aos microrganismos para suas atividades metabólicas (Saidulu; Gupta e Majumder; 2020).

Durante o processo de utilização dos substratos pelos micróbios, a espessura do biofilme aumenta. Como o oxigênio dissolvido só pode se espalhar para uma determinada área do biofilme, a zona anaeróbica é formada no biofilme interno próximo as paredes (Jagaba *et al.*, 2021), conforme ilustrado na Figura 2.

O biofilme fornece integridade estrutural, proteção bacteriana de microrganismos críticos e sensíveis, comunicação intercelular, formação e manutenção da microcolônia, além de captação e consumo de nutrientes, sendo de vital importância para o desempenho do sistema de processamento de biofilme (Boltz *et al.* 2017).

Figura 2: Esquematização do biofilme.



Fonte: Metcalf & Eddy (2016).

Vários pesquisadores se propuseram a investigar o desenvolvimento do biofilme nesses reatores.

Calderón *et al.* (2012) tiveram como objetivo encontrar relações entre diferentes condições operacionais e a estrutura dos biofilmes bacterianos desenvolvidos em um MBBR. Como resultado constataram que a fração recheio ou fração de enchimento é o principal fator operacional que influencia a estrutura da comunidade bacteriana nos biofilmes de uma estação de tratamento de águas residuais urbanas em escala laboratorial.

Melchior (2019) avaliou o desenvolvimento do biofilme em meio suporte esponjoso em um reator MBBR tratando efluente de indústria de celulose.

Castro (2018) avaliou a evolução da eficiência de um sistema de tratamento biológico de esgotos urbanos durante o período de partida e a formação do biofilme em um reator MBBR em escala piloto.

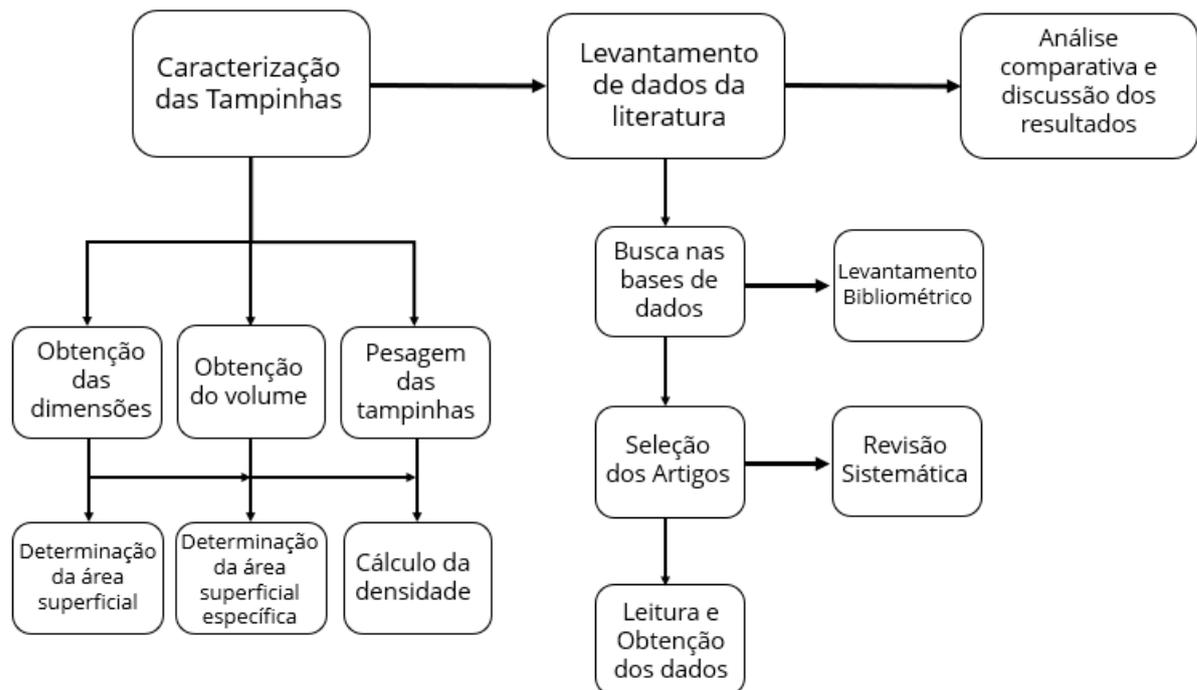
## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção fornece uma descrição detalhada dos métodos utilizados no estudo e apresenta os procedimentos experimentais de forma clara, destacando as etapas e protocolos seguidos.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO SUPORTE

A Figura 3 apresenta o percurso metodológico utilizado nesse trabalho.

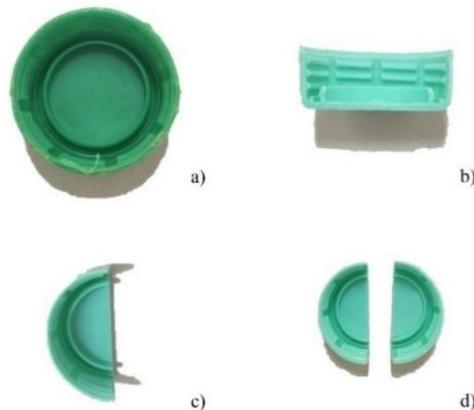
Figura 3: Esquematização da metodologia utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para caracterizar o meio suporte (tampas de garrafas obtidas através de doação (Figura 4)), foram escolhidas aleatoriamente algumas unidades de tampinhas de garrafa. A partir daí mediu-se com o paquímetro as dimensões das tampinhas como altura, diâmetro interno, diâmetro externo e espessura.

Figura 4: Vistas da tampinha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Diante disso, foi possível determinar a área superficial interna das tampinhas através da equação da área superficial de um cilindro, excluindo uma das bases (Equação 1). Isso considerando que as tampinhas fossem um cilindro liso (sem as ranhuras).

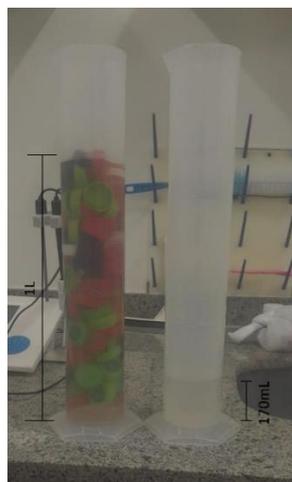
$$A_S = 2\pi rh + \pi r^2 \quad (1)$$

Onde:

- $A_S$  é a área superficial interna;
- $r$  é o raio;
- $h$  é a altura.

Após a obtenção da área superficial unitária, foi determinado o volume das tampinhas. Para a obtenção dessa informação, foi realizado um procedimento sequencial e preciso (Figura 5).

Figura 5: Determinação do volume das tampinhas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Primeiramente, para calcular o volume de uma única tampinha foi utilizado uma proveta de 1 litro. As tampinhas foram adicionadas à proveta até atingir a marca de 1 litro. Em seguida, foi feita transferência gradual da água de outra proveta de 1 litro para a proveta contendo as tampinhas, preenchendo o volume restante até a marca de 1 litro. O volume de água restante na segunda proveta foi registrado. A diferença entre o volume final e o volume inicial foi calculada e dividida pela quantidade de tampinhas presentes na proveta. O resultado disso foi considerado como o volume de uma única tampinha.

Com o volume das tampinhas e a área superficial já obtidos, descobriu-se a área superficial específica do meio suporte através da Equação 2.

$$A_{SE} = \frac{A_s}{V} \quad (2)$$

Onde:

- $A_{SE}$  é área superficial específica;
- $A_s$  é área superficial de uma tampinha;
- $V$  é o volume de uma tampinha.

Além disso, a densidade da tampinha também foi determinada.

A massa de uma única tampinha foi obtida por meio de pesagem em uma balança. E com os dados de massa e volume obtidos, foi possível calcular a densidade da tampinha dividindo a massa pelo volume correspondente.

Além disso, as tampinhas também foram pesadas em balança analítica (Figura 6) a fim de obter o peso médio das tampinhas, para posteriores cálculos de densidade.

Figura 6: Pesagem das tampinhas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

## 4.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA

O método aplicado para o levantamento das informações sobre as mídias biológicas foi a uma revisão sistemática dos trabalhos publicados na literatura. Com esse intuito, realizou-se buscas na literatura (plataforma da *Scopus* através do acesso da CAPES – CAFe, no dia 10/09/2023), sem recorte temporal, com os seguintes descritores: “*Moving bed biofilm reactor*”, “MBBR”, “*Wastewater treatment*”, “*Sewage treatment*” e “*Biocarrier*”.

Foram aplicados termos booleanos para direcionar melhor a busca. Sendo assim, os termos de busca com os operadores booleanos ficaram organizados da seguinte forma: (“MBBR” OR “*Moving bed biofilm reactor*”) AND (“*wastewater treatment*” OR “*sewage treatment*”) AND (“*biocarrier*”).

Foi realizada uma seleção dos artigos encontrados para garantir que não houvesse tangenciamento ao tema de interesse. O critério de inclusão utilizado foi que os artigos apresentassem características sobre as mídias biológica utilizadas no artigo sendo elas convencionais ou alternativas.

Essa busca retornou cerca de 32 artigos. A partir daí foi realizada uma revisão bibliométrica onde carregou-se os dados bibliométricos da plataforma da *Scopus* para uma planilha Excel e realizou-se o tratamento dos dados para extrair as informações de interesse. Com isso, foi possível gerar gráficos como número de publicações por autor, número de publicações por ano, número de publicações por revista e número de publicações por país.

Após a leitura dos títulos e resumos dos 32 trabalhos retornados pela busca na plataforma da *Scopus*, foram excluídos 12 artigos que não se enquadravam com a proposta temática deste trabalho. Posteriormente, foi realizada a leitura completa desses 20 artigos elegíveis e os que possuíam as descrições das características das biomídias utilizadas pelos autores foram selecionados para agregar a este trabalho para posterior comparação. Assim, restaram apenas 10 trabalhos e as características das mídias utilizadas foram compiladas em uma tabela.

Por fim, também foi possível realizar a obtenção das características das mídias biológicas utilizadas nos trabalhos levantados para posterior comparação com os resultados obtidos nesse trabalho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo avaliar a potencialidade das tampas de garrafas em PEAD como material suporte alternativo para aderência de microrganismos em reator MBBR, esta seção serve para a apresentação dos resultados obtidos e estará subdividida em três capítulos: i) Caracterização das tampinhas de garrafa, ii) Levantamento integrativo e bibliométrico da literatura e iii) discussão geral dos resultados.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SUPORTE

Após da obtenção das tampinhas de garrafa, realizou-se seleção das tampinhas para servir de mídia biológica no sistema experimental. Das selecionadas, retiraram-se cinco de maneira aleatória para realizar a caracterização. Na Tabela 2 é possível observar as dimensões médias obtidas das tampinhas.

Tabela 2: Dimensões obtidas das tampinhas de garrafa.

Diâmetro interno (cm)	Diâmetro externo (cm)	Altura externa (cm)	Altura interna (cm)	Espessura superior (cm)	Espessura lateral (cm)
2,8	3,0	1,2	1,07	0,13	0,1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 3: Propriedades das tampinhas.

Peso médio (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial interna (m <sup>2</sup> )	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
2,06	2,3	0,9	0,00156	678

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

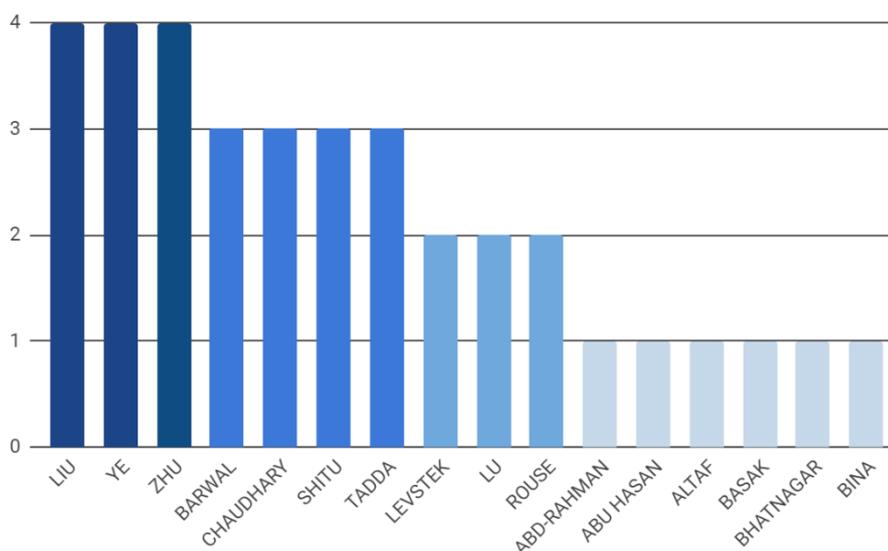
A área superficial específica encontrada para a tampinha em PEAD é superior a maioria das áreas superficiais das mídias biológicas disponíveis na Tabela 1, sendo inferior apenas da Biofilm-Chip M, Biofilm-Chip P e a B&F PE03. Além disso, a área superficial e a densidade das tampinhas são maiores ao que a NBR 12.209/2011 indica. A área superficial das tampinhas também é inferior da mídia utilizada no experimento de Freitas (2019) de 1000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de área superficial.

### 5.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE MÍDIAS BIOLÓGICAS

A Figura 7 apresenta um gráfico com o número de publicações por autores, onde os autores que mais publicam sobre o tema são Dezhao Liu, Zhangying Ye e Songming Zhu com

5 publicações cada, seguidos de Anjali Barwal, Rubina Chaudhary, Abubakar Shitu e Musa Abubakar Tadda com 4 publicações cada.

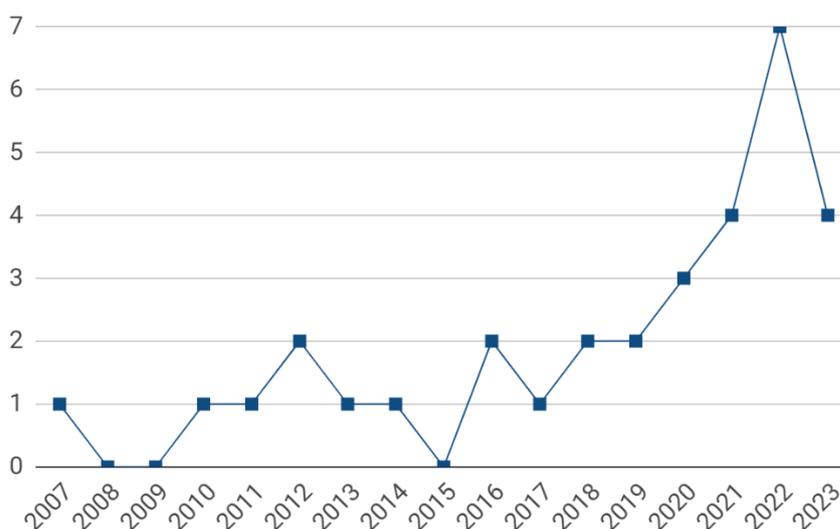
Figura 7: Quantidade de publicações por autor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 8 apresenta a evolução da quantidade de artigos publicados sobre o tema ao longo dos anos. Foi possível observar que o primeiro artigo que se tratava desse tema foi publicado em 2007 e o crescimento ao longo da próxima década foi tímido. Porém, é possível observar que nos últimos cinco anos houve um crescimento acelerado, sendo 2022 o ano com o maior número de publicações sobre o tema (cerca de 7 artigos). O ano de 2023 apresentou queda pelo fato deste trabalho estar sendo escrito na decorrência do ano.

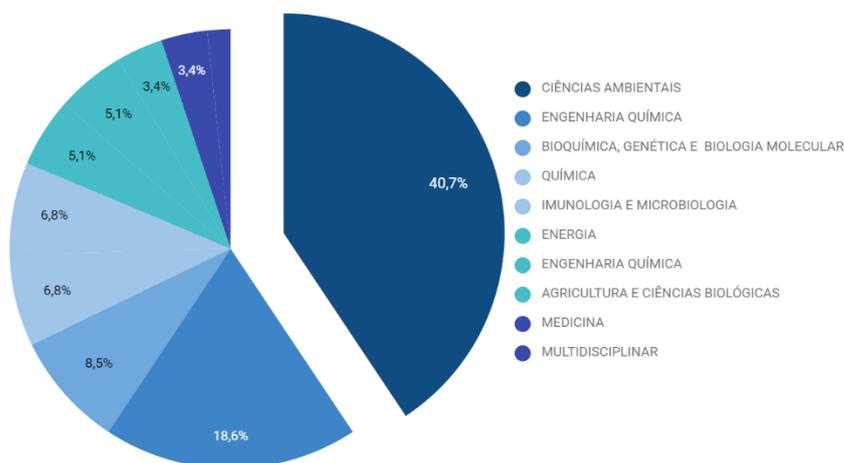
Figura 8: Quantidade de publicações por ano.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A quantidade de publicações realizadas por área do conhecimento é apresentada na Figura 9. Nota-se que as três áreas do conhecimento que sobressai em termos de quantidade de publicação sobre o assunto é a *Environmental Science* com 24 artigos publicados, *Chemical Engineering* com 11 artigos publicados e *Biochemistry, Genetics and Molecular Biology* com cinco artigos publicados.

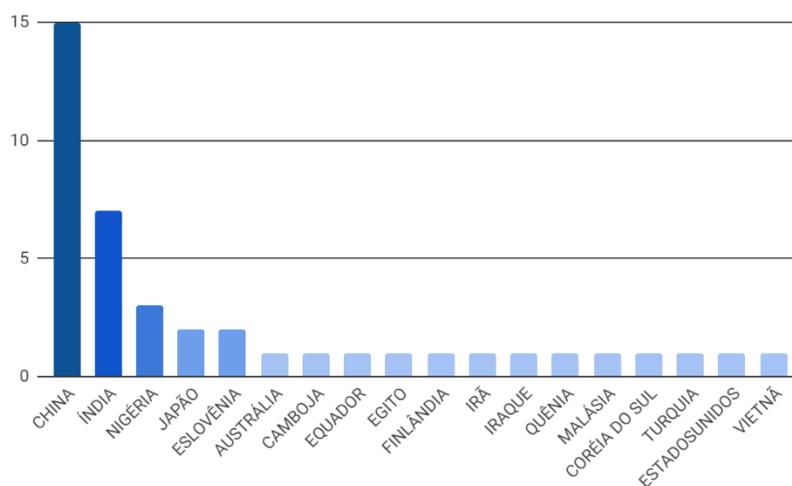
Figura 9: Gráfico do número de publicações por área do conhecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Figura 10 é possível observar os países que mais tem se voltado a pesquisar sobre o tema, ou seja, aqueles que possuem o maior número de publicações. É notável o destaque de 5 países, sendo o primeiro deles a China com um total de 15 artigos publicados, seguido da Índia, com um total de 7 artigos publicados, a Nigéria com 3 e o Japão e Eslovênia empatados com 2 artigos publicados sobre o tema.

Figura 10: Gráfico do número de publicações por País.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir desse levantamento bibliométrico, percebe-se que as pesquisas com relação as mídias biológicas alternativas no tratamento de águas residuárias vem crescendo nos últimos anos. A China destaca-se como país que mais tem publicado sobre o assunto e as revistas que mais possuem publicações nessa linha de pesquisa estão na área ambiental e de engenharias. O autor que possui mais publicações no tema é o Dezhao Liu (Liu, D.), da China.

### 5.3 REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE MÍDIAS BIOLÓGICAS

Chen *et al.* (2012) realizaram uma modificação das superfícies das mídias biológicas utilizadas por eles, através de dois métodos de oxidação química (superfície coberta com íon férrico e enxerto superficial de gelatina). Durante o experimento foram simulados 3 reatores MBBR, preenchidos com efluente sintético e operados continuamente por 8 horas. Cada MBBR utilizado foi preenchido com uma das mídias biológicas em PEAD modificadas a ser testada a uma fração de enchimento de 40%.

Como resultado, a concentração de biomassa no estado estável aumentou 54,8% e o tempo de inicialização necessário para a formação do biofilme maduro foi reduzido em 37,5% quando a mídia biológica foi modificada pelo método de cobertura com íon férrico. Para a mídia biológica modificada por enxerto de gelatina, a biomassa máxima aderida à mídia foi aumentada em 76,1% e o tempo de inicialização necessário para a formação do biofilme maduro foi reduzido em 60% (Chen *et al.*, 2012).

A eficiência de remoção de DQO foi aumentada respectivamente em 10,63 e 8,64% usando os métodos de modificação de cobertura com íon férrico e enxerto de gelatina respectivamente. O biofilme foi desenvolvido melhor nas mídias modificadas, principalmente na mídia que foi coberta por íon férrico em comparação com a mídia bruta utilizada durante o período de operação (Chen *et al.*, 2012).

Sabzali, Nikaeen e Bina (2012) voltaram-se a avaliar a capacidade dos resíduos de filtros de cigarro como mídias biológicas baratas usando um processo anóxico em um reator MBBR. Durante o experimento foram utilizados reatores MBBR, com mídia biológica do tipo Kaldnes K3 e outro com hastes de filtro de cigarro. O reator com mídias K3 foi preenchido com 50% de mídias e o que possuía hastes de filtro de cigarro como mídias biológicas e estavam com 8,3% de fração de enchimento. Ambos os reatores foram alimentados com águas residuárias sintéticas.

Obtiveram como resultado que eficiência média de remoção de DQO foi de 61,3% e 64,5% para o MBBR com hastes de filtro de cigarro (Reator A) e o MBBR com meio plástico Kaldnes (Reator B), respectivamente. Os resultados também demonstram que o desempenho

do MBBR contendo 0,25 litros de filtros de cigarro foi comparável com um reator semelhante contendo 1,5 litros de meio plástico Kaldnes. E uma remoção média de fósforo de 67,7% e 72,9% foi alcançada pelos Reatores A e B, respectivamente (Sabzali, Nikaeen e Bina, 2012).

Já Wang, Zhou e Zhao em (2018), se concentraram na investigação de uma mídia biológica contendo nanopartículas (NPs) de zinco (Zn), que pode liberar íons zinco de maneira controlada para aumentar a bioatividade de maneira ideal. O MBBR utilizado, preenchido com mídias biológicas contendo 20% em peso de NPs de Zn, com perfil de liberação de íons zinco de 0,4 mg/L teve o melhor desempenho. Além disso, as eficiências de remoção de DQO e N-NH<sub>3</sub> foram maiores que os reatores preenchidos com outras mídias.

Pena, Carrano e Blersch (2020) voltaram-se a avaliar o desempenho de mídias biológicas de meios filtrantes impressos em 3D com diferentes *designs* de área superficial para uso na nitrificação de MBBRs para tratamento de águas residuais. No experimento, foi utilizado efluente sintético para avaliar a remoção de nitrogênio testando as novas mídias biológicas em um período de 8h de reação com oxigenação constante e os reatores estes foram colocados em banho-maria para manter a temperatura constante de 30°C.

Em geral, as mídias biológicas do tipo giróides que foram desenvolvidas por eles e estavam sendo, obtiveram desempenho melhor do que a mídia K1 convencional. Para todos os cenários, os designs dos giróides de áreas superficiais específicas grande e média forneceram os melhores desempenhos de nitrificação, alcançando taxas de remoção de 99,33% e 94,74% de remoção de nitrogênio em 8 horas de reação (Pena, Carrano e Blersch, 2020).

Shitu *et al.* (2020) avaliaram uma nova mídia biológica feita de esponja (SB) em biorreator de leito móvel (MBBR) para tratamento de águas residuais de sistemas de aquicultura recirculantes. O experimento contou com dois MBBRs em escala de laboratório que foram operados simultaneamente por 116 dias sob vários tempos de retenção hidráulica (TDH). Os reatores R1 e R2 foram preenchidos com transportadores plásticos K5 e SB, respectivamente. Com isso, obtiveram como resultado um TDH ideal de 6 h, eficiência de remoção de amônia e a taxa de nitrificação foram de 86,67±2,4% e 1,43 mg/L.h para o R1 e, 91,65±1,3% e 1,52 mg/Lh para o R2, respectivamente.

Mao *et al.* (2021) buscaram otimizar as condições de operação do biorreator de leito móvel (MBBR) para tratamento de águas residuárias domésticas de baixa resistência utilizando um produto comercial, álcool polivinílico em gel (PVA gel), e um carreador local, fibra de coco. Realizaram um desenho de superfície de resposta para avaliar a interação de duas variáveis independentes – proporção de meio mídias biológicas (10-30%) e tempo de retenção hidráulica

(60-300 min) – para a remoção de demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total e fósforo total.

Com base no processo de otimização usando o RSD, a eficiência máxima de remoção de DQO foi alcançada em 300 min de TDH com 30% de gel de PVA (> 70% de eficiência de remoção) e 25% de mídias biológicas de fibra de coco (> 50% de eficiência de remoção). Além disso, as eficiências máximas de remoção de nitrogênio total (42-53%) e fósforo total (38-42%) foram encontradas em uma proporção de meio de 30% com 300 min de TRH para ambos os biotransportadores (Mao *et al.*, 2021).

Mazioti *et al.* (2021) investigaram o potencial dos MBBRs em escala de laboratório para tratar água de esgoto salina real e de alta concentração, bem como determinar as comunidades microbianas envolvidas no processo. Durante a operação do experimento, diferentes condições de estresse foram aplicadas para avaliar o desempenho dos sistemas: choque de carga orgânico/hidráulico (demanda química de oxigênio (DQO): 9 g/L; tempo de retenção hidráulica (TDH): 48–72 h e choque de salinidade (salinidade: 40 ppt). No biorreator preenchido com biocarreadores K3 foi observada maior concentração de biomassa. O biofilme desenvolvido nos biotransportadores Mutag BioChip apresentou menor biodiversidade, enquanto as poucas espécies identificadas nas águas residuais brutas não foram dominantes nos biorreatores.

Song *et al.* (2021) buscaram avaliar o desempenho de uma nova mídia biológica feita a partir de uma combinação entre poliuretano e biocarvão de cascas de abacaxi na desnitrificação em um reator MBBR anóxico. Assim, utilizaram dois reatores MBBR em escala de bancada preenchidos com espuma de poliuretano, sendo um deles com espumas não modificadas para servir de controle e outras com as mídias modificadas com carvão ativado da casca de abacaxi.

Os reatores foram operados a temperatura ambiente com tempo de detenção hidráulica de 12 horas durante 90 dias. A mídias utilizadas possuíam formato cúbico com dimensões médias de 1,5 cm a uma taxa de preenchimento de 20%. Constataram que a eficiência da desnitrificação com a mídia biológica de poliuretano modificada com o carvão ativado foi aumentada, assim como a biomassa nas mídias foi aumentada (cerca de 1,47 vezes e aumentou significativamente o teor de enzimas desnitrificantes (Song *et al.*, 2021).

Maurya *et al.* (2023) focaram na modificação da superfície do biocarreador convencional de polipropileno (PP) via oxidação química e revestimento de cálcio para a degradação do corante azo. O desempenho das mídias biológicas na remoção do corante *Acid blue* 113 de um efluente têxtil sintético foi estudado em sistemas de reatores de biofilme de leito móvel (MBBR), otimizando parâmetros do processo, como concentração de corante e tempo de retenção hidráulica. O tratamento químico resultou no PP hidrofóbico e em um

material hidrofílico, o que aumentou a adesão bacteriana. As mídias biológicas modificadas que foram preenchidas no MBBR apresentaram eficiência máxima de remoção de corante de 83,75% em condições otimizadas.

Shi *et al.* (2023) selecionaram um biocarreador duro de polipropileno amplamente utilizado e quatro moles de poliuretano com tamanhos diferentes para avaliar os efeitos de diferentes tipos e tamanhos de materiais na nitrificação em um reator MBBR. Foram utilizadas águas residuárias sintética, um sistema MBBR em escala de laboratório sob diferentes condições orgânicas e taxas de carregamento durante um período de 160 dias. Além disso, as mídias biológicas eram de diferentes tamanhos e formatos (cilíndrico e cúbico), diferentes áreas superficiais específica e eram feitas em polipropileno e poliuretano.

Em síntese, ficou claro que a busca e o desenvolvimento de mídias biológicas alternativas têm apresentado resultados satisfatórios, com elevadas eficiências de remoção de carga orgânica e de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Os pesquisadores têm se voltado a buscar mídias que apresentem grandes áreas superficial específica, baixa densidade e que facilitem a adesão microbiana.

Isso fica evidente com o aumento do número de trabalhos publicados nos últimos anos em diferentes países. Além disso, os pesquisadores vêm buscando formas de diminuir os custos com os materiais das biomídias tanto buscando alternativas entre os materiais que são considerados resíduos quanto utilizando novos materiais.

Nesse sentido, observa-se que, entre os trabalhos publicados recentemente, a adoção de biomídias alternativas de baixo custo não apenas manteve a eficiência na remoção de poluentes dos efluentes investigados, mas, em muitos casos, promoveu um notável aumento no crescimento da biomassa microbiana, superando as mídias biológicas convencionais.

#### 5.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TAMPINHAS E AS MÍDIAS DA LITERATURA

Tabela 4: Dados de mídias biológicas disponíveis na literatura.

Autor (ano)	Diâmetro	Área Superficial Específica	Densidade	Material	Imagem
Chen <i>et al.</i> (2012)	7 mm	800 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0,97–0,98 g/cm <sup>3</sup>	PEAD alterado com partículas inorgânicas	-
	20 mm	523,8 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1,033 kg/m <sup>3</sup>	Polímero Acrílico	
	20 mm	1013 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1,033 kg/m <sup>3</sup>	Polímero Acrílico	
Pena, Carrano e Blersch (2020)	20 mm	1981 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	1,033 kg/m <sup>3</sup>	Polímero Acrílico	
	19,39 mm	1519 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	950 kg/m <sup>3</sup>	PEAD	
Maurya <i>et al.</i> (2023)	2,5 cm	520 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	920 kg/m <sup>3</sup>	Polipropileno (PP)	-
Mazioti <i>et al.</i> (2021)	25 mm	500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	-	PEAD	
	30 mm	5500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	165 kg/m <sup>3</sup>	Polietileno (PE)	
Sabzali, Nikaeen e Bina (2012) - Hastes de filtro de Cigarro	7 mm	18520 - 23560 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	-	Acetato de Celulose	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com base nas Tabelas 1, 3 e 4 é possível observar que as tampinhas de garrafas apresentam área superficial específica superior ao que a NBR 12.209/2011 recomenda para mídias biológicas em reatores de leito móvel. Além disso, as tampinhas de garrafas são feitas em PEAD, material mais comumente usado na literatura e nas mídias biológicas convencionais,

e não precisaram de modificações física ou química em sua estrutura para atingir a elevada área superficial específica, diferente de Maurya *et al.* 2023 e Song *et al.* 2011.

As tampinhas apresentaram área superficial específica superior a uma das médias impressa no trabalho de Pena, Carrano e Blersch (2020) com 523,8 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, também foi superior a uma das utilizadas por Mazioti *et al.* (2021) que era constituída pelo mesmo material e possuía área superficial de 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Também possui a área superficial específica maior que a maioria das médias convencionais disponíveis na Tabela 1, ficando atrás apenas da média biológica denominada Biofilm chip M, Biofilm chip P e da mídia B&F PE03.

Tabela 1: Informações sobre as características das mídias biológicas utilizadas em reatores MBBR.

<b>Autor</b>	<b>Modelo</b>	<b>Material</b>	<b>Formato</b>	<b>Área Superficial Específica</b>
Bakar <i>et al.</i> (2020)	BPM	Polipropileno	Cilíndrico	450 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	HEX	Polietileno	Cilíndrico	320 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Odegaard, (2004)	K1	Polietileno de Alta Densidade	Cilíndrico	500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	K2	Polietileno de Alta Densidade	Cilíndrico	350 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	K3	Polietileno de Alta Densidade	Cilíndrico	500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Das e Naga (2011) apud Barwal e Chaudhary (2014)	NATRIX C2	Polietileno de Alta Densidade	-	220 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	NATRIX M2	Polietileno de Alta Densidade	-	200 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	Biofilm-Chip M	Polietileno de Alta Densidade	-	1200 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
	Biofilm-Chip P	Polietileno de Alta Densidade	-	900 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Barwal e Chaudhary (2017)	-	Poliestireno de baixo custo	Elipsoide	380 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Oliveira (2019)	B&F PE03	Polietileno de Alta Densidade	Cilíndrico	1000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Quanto à densidade, a NBR 12.209/2011 indica que as mídias biológicas para reatores de leito móvel esteja entre 0,92 e 0,98. As tampinhas de garrafas apresentaram densidade muito próxima à essa faixa de valores (0,9 g/cm<sup>3</sup>), o que também é compatível com a densidade da mídia biológica utilizada no trabalho de Chen *et al.* (2012), que possuía densidade de 0,97 – 0,98 g/cm<sup>3</sup>, porém é superior ao valor encontrado por Pena, Carrano e Blersch (2020) que possuía densidade de 0,001033 g/cm<sup>3</sup>.

As tampinhas de garrafa em PEAD, muitas vezes apresentaram diâmetro superior as das mídias biológicas encontradas na literatura como as das mídias utilizadas por Sabzali, Nikaeen e Bina (2012) com 7 mm, ou as utilizadas por Maurya *et al.* (2023) que possuíam 2,5 cm. Porém, o diâmetro da tampinha de garrafa foi numericamente igual a utilizada por Mazioti *et al.* (2021) com 30 mm.

Com a conclusão da análise e discussão dos resultados, o Quadro 1 recupera os objetivos específicos proposto para esse trabalho, apresentando evidências de seu cumprimento.

Quadro 1 Recuperação dos objetivos dos trabalhos e indícios ou constatações de consecução.

Objetivo Específico	Indícios e/ou Constatações
i) Caracterização da tampinha	As tampinhas de garrafa em PEAD apresentaram diâmetro interno de 2,8 mm, volume de 2,3 cm <sup>3</sup> , massa de 2,06 g e área superficial específica de 678 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> . Com isso foi possível realizar os cálculos para a obtenção da área superficial específica e densidade das tampinhas para posteriores comparações.
ii) Levantamento teórico e bibliométrico	Quanto ao levantamento das informações bibliométricas, ficou claro que o maior número de publicações acerca do assunto é proveniente da China, a área do conhecimento com o maior número de publicações é a Environmental Science, o autor que mais possui publicações é o Dezhao Liu e o ano com o maior número de publicações até agora foi o ano de 2022. Quanto aos dados levantados sobre mídias biológicas, ficou evidente que há uma variação de materiais, tamanhos, formas e áreas superficiais.
iii) Comparação entre as tampinhas e as mídias biológicas convencionais	Com a comparação entre os dados obtidos entre as tampinhas de garrafa com as mídias disponíveis na literatura, foi possível perceber que as tampinhas de garrafa possuem características semelhantes as da biomídias disponíveis comercialmente e das utilizadas na literatura, com área superficial muitas vezes superior a essas.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

## 6 CONCLUSÕES

O presente capítulo traz uma síntese dos principais resultados da pesquisa realizada e discute as contribuições teóricas e apresenta sugestões para investigações futuras.

Com relação a área superficial, as tampinhas de garrafa fabricadas em PEAD são compatíveis com as áreas superficiais encontradas para as mídias disponíveis no mercado, porém apresentando baixo custo pois trata-se de um resíduo abundantemente disponível.

As tampinhas de garrafa possuem estrutura física semelhante a maioria das mídias biológicas específicas para a aderência dos microrganismos em reatores MBBR e são fabricadas no mesmo material.

Com base no que foi levantado, as tampinhas de garrafa em PEAD possuem características físicas que não apenas se igualam, mas também superam aquelas das mídias biológicas disponíveis comercialmente. Sob esta perspectiva, essas tampas detêm o potencial de substituir os meios biológicos convencionais dentro de um reator do tipo MBBR destinado ao tratamento de efluentes.

Considerando que haja continuidade dessa pesquisa, sugere-se a realização de experimento para verificar a aderência dos microrganismos nesse material. Além disso, verifique as eficiências de remoção de carga orgânica e nutrientes, espessura do biofilme e compare o desempenho das tampinhas de garrafa com outros tipos de mídias biológicas ou tecnologia de tratamento. Há também a possibilidade de realizar o experimento com diversos tipos de efluentes em diversas escalas. Ainda pode-se variar os parâmetros que determinam a eficiência do sistema como tempo de detenção hidráulica, carga orgânica, taxa de preenchimento, aeração, etc.

É possível ainda realizar modificações nas tampinhas de garrafa para aumentar ainda mais a área superficial específica, diminuir o volume ou mudar a constituição da tampinha para que reduza a eletronegatividade do material e haja maior e mais rápida constituição e amadurecimento do biofilme.

## REFERÊNCIAS

- ABDELFATTAH; HOSSAIN; CHENG; High-strength wastewater treatment using microbial biofilm reactor: a critical review. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**. 2020.
- ABNT. NBR-12.209. **Norma Brasileira para Elaboração de Projetos Hidráulico-sanitários de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários**. Rio de Janeiro. 2011.
- AL-AMSHAWEE et al. Biocarriers for biofilm immobilization in wastewater treatments: a review. **Environmental Chemistry Letters**. 2020.
- ANDREOTTOLA; FOLADORI; RAGAZZI; TATÀNO; Experimental comparison between MBBR and activated sludge system for the treatment of municipal wastewater. **Water Science and Technology**. 2000.
- BAKAR; HASAN; MOHAMMAD; ABDULLAH; NGTANI; YUSOF; Performance of a laboratory-scale moving bed biofilm reactor (MBBR) and its microbial diversity in palm oil mill effluent (POME) treatment. **Process Safety and Environmental Protection**. 2020.
- BARWAL; CHAUDHARY. 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. **Environmental Science Biotechnology**. 2014.
- BELLONI, Diego Felipe. **Desempenho de um filtro biológico aerado submerso utilizando como meio suporte tampas de garrafas PET**. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá – Maringá, 2011.
- BOLTZ et al. From biofilm ecology to reactors: a focused review. **Water Science & Technology**. 2017.
- CALDERÓN; MARTÍN-PASCUAL; POYATOS; RODELAS; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; GONZÁLEZ-LÓPEZ; 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. **Bioresource Technology**. 2012.
- CASTRO, R. A. **Partida de um sistema combinado BARDENPHO-MBBR de tratamento de esgotos municipais e quantificação da biomassa aderida em meio suporte**. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.
- CHEN; SUN; CHUNG; Treatment of pesticide wastewater by moving-bed biofilm reactor combined with Fenton-coagulation pretreatment. **Journal of Hazardous Materials**. 2007.
- CHEN; CHENG; ZHANG; SUN; Influence of surface modification of polyethylene biocarriers on biofilm properties and wastewater treatment efficiency in moving-bed biofilm reactors. **Water Science & Technology**. 2012.
- CORNELLI; AMARAL; DANILEVICZ; GUIMARÃES; Métodos de tratamento de esgotos domésticos: uma revisão sistemática. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 16, n. 2, p. 20-36, jul. 2015. ISSN 1983-1501.
- CHU; WANG; QUAN; XING; TANG; ZHANG; Modification of polyurethane foam carriers and application in a moving bed biofilm reactor. **Process Biochemistry**. 2014.
- DE OLIVEIRA, D. V. M. **Caracterização dos parâmetros de controle e avaliação de desempenho de um reator biológico com leito móvel (MBBR)**. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- DIAS; BELLINGHAM; HASSAN; BARRET; STEPHENSON; SOARES; Influence of carrier media physical properties on start-up of moving attached growth systems. **Bioresource Technology**. 2018.

- DI BIASE; KOWALSKI; DEVLIN; OLESZKIEWICZ; Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. **Journal of Environmental Management**. 2019.
- FREITAS; HOFFMANN; DANIEL; Uso de flocos de PEAD reciclável (polietileno de alta densidade) como meio suporte em reator MBBR tratando esgoto sanitário. 2019, Anais. Rio de Janeiro, RJ: **ABES**, 2019.
- FUJII, F. Y. **Análise comparativa entre o processo de lodo ativado e o reator de biofilme de leito móvel na remoção de nitrogênio de esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- GARCIA; LAPA; FORESTI; ZAIAT; Effects of bed materials on the performance of an anaerobic sequencing batch biofilm reactor treating domestic sewage. **Journal of Environmental Management**. 2008.
- HUANG; PENG; PENG; LIN; ZHANG; REN; Towards the biofilm characterization and regulation in biological wastewater treatment. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 2018.
- JAGABA; KUTTY; NOOR; BIRNIWA; AFFAM; LAWAL; KANKIA; KILACO; A systematic literature review of biocarriers: Central elements for biofilm formation, organic and nutrients removal in sequencing batch biofilm reactor. **Journal of Water Process Engineering**. 2021.
- JORDÃO E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. ABES. Edição. Rio de Janeiro, 2005.
- LIU; ZHOU; XU; HE; XIN; MA; FANG; ZHANG; LIU; JIANG; DONG; Performance evaluation of a lab-scale moving bed biofilm reactor (MBBR) using polyethylene as support material in the treatment of wastewater contaminated with terephthalic acid. **Chemosphere**. 2019.
- MAO; QUAN; ZHAO; ZHANG; CHEN; LIU; QUAN; et al. Accelerated startup of moving bed biofilm process with novel electrophilic suspended biofilm carriers. **Chemical Engineering Journal**. 2017.
- MAO; SANG; CHAN; BUN; Experimental and empirical investigation of commercial and local biocarriers in moving bed bioreactor for treating low-strength domestic wastewater. **Asia-Pacific Journal of Science and Technology**. 2021.
- MAURYA; KUMAR; SONWANI; JAISWAL; VERMA; SINGH; Enhancement of azo dye bioremediation using chemically modified polypropylene biocarrier: Comparative analysis and kinetic modeling. **Bioresource Technology Reports**. 2023.
- MAZIOTI; KOUTSOKERAS; CONSTANTINIDES; VYRIDES; Untapped Potential of Moving Bed Biofilm Reactors with Different Biocarrier Types for Bilge Water Treatment: A Laboratory-Scale Study. **Water**. 2021.
- MCQUARRIE e BOLTZ. Moving Bed Biofilm Reactor Technology; Process Applications, Design, and Performance. **Water Environment Research**. 2011.
- MELCHIORI, 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**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 76f. 2019.
- METCALF & EDDY. Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos. 6.th. Nova York: Mcgraw Hill, 2016.
- ØDEGAARD e RUSTEN. State of the art in europe of the moving bed biofilm reactor (MBBR) process. 2004.
- ØDEGAARD, H. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process.

**Water Sci. Technol.** 2006.

- ØDEGAARD, H. New Applications for MBBR and IFAS Systems. **Frontiers in Wastewater Treatment and Modelling.** 2017.
- OLIVEIRA e SANTOS. Avaliação de desempenho do sistema MBBR aplicando dois diferentes modelos de meios suporte para o tratamento de esgoto. **AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp.** 2018.
- PINTO, H. B. **Proposta de tratamento de águas residuárias de indústria de defensivos agrícolas visando ao reuso: tecnologia MBBR e processos físico-químicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.
- PROANO-PENA, CARRANO E BLERSCH. Analysis of very-high surface area 3D-printed media in a moving bed biofilm reactor for wastewater treatment. **PLOS ONE.** 2020.
- RUSTEN et al. Design and operations of Kaldnes Moving Bed Biofilm Reactors. **Aquacultural Engineering.** 2005.
- SABZALI, NIKAEEN E BINA. Performance evaluation of cigarette filter rods as a biofilm carrier in an anaerobic moving bed biofilm reactor. **Environmental Technology.** 2012.
- SAIDULU; MAJUMDER; GUPTA; A systematic review of Moving Bed Biofilm Reactors, Membrane Bioreactors, and Moving Bed Membrane Bioreactors for wastewater treatment: a comparison of research trends, removal mechanisms, and performance. **Journal of Environmental Chemical Engineering.** 2020.
- SALVETTI, R. et al. Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors. **Water Research.** 2006.
- SHI; TIAN; WANG; YU; TIAN; YANG; Effects of biocarrier type and size on the performance of nitrification and simultaneous nitrification and denitrification. **Journal of Environmental Chemical Engineering.** 2023.
- SHITU; ZHU; QI; TADDA; LIU; YE; Enhanced aquaculture wastewater treatment in a biofilm reactor filled with sponge/ferrous oxalate/biochar composite (Sponge-C<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>@NBC) biocarriers: Performance and mechanism. **Chemosphere.** 2020.
- SILVA, R. B. **Tratamento conjugado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico por processo anaeróbio seguido de aeróbio.** 2014. 75 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.
- SODHI; SINGH; CHEEMA; SHARMA; BANSAL; JHA; Simultaneous sludge minimization, pollutant and nitrogen removal using integrated MBBR configuration for tannery wastewater treatment. **Bioreources Technology.** 2021.
- SONG; ZHANG; NGO; GUO; SONG; ZHANG; WEN; GUO; Zeolite powder based polyurethane sponges as biocarriers in moving bed biofilm reactor for improving nitrogen removal of municipal wastewater. **Science of The Total Environment.** 2019.
- SONG; SU; LI; SUN; DONG; ZHAO; WEN; LIAO; Facial fabricated biocompatible homogeneous biocarriers involving biochar to enhance denitrification performance in an anoxic moving bed biofilm reactor. **Bioresource Technology.** 2021.
- SOUZA, F. V. **Desempenho de reatores biológico com leito móvel no pós-tratamento de reator anaeróbio.** Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2019.
- SOWANI; SWAIN; GIRI; SINGH; RAI; A novel comparative study of modified carriers in moving bed biofilm reactor for the treatment of wastewater: Process optimization and kinetic study. **Bioresource Technology.** 2019.
- VIANA, C. C. **Avaliação do tratamento de águas residuárias em reatores de leito móvel com biofilme de um laticínio da zona da mata de minas gerais.** Dissertação

(Mestrado em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2022.

VON SPERLING, M.; **Lodos Ativados**. 6ª edição. Editora FCO. Minas Gerais, 2016.

WOLFF; PAUL; DA COSTA; Influência do tipo de material suporte no desempenho de reatores biológicos de leito móvel na remoção de carbono e nitrificação de esgoto sanitário. **Eng. Sanit. Ambient.**2010.

WANG; ZHOU; ZHAO; The performance of biocarrier containing zinc nanoparticles in biofilm reactor for treating textile wastewater. **Process Biochemistry**. 2018.

ZHAO; LIU; HUANG; YANG; JI; NGHIEM; TRINH; TRAN; Insights into biofilm carriers for biological wastewater treatment processes: Current state-of-the-art, challenges, and opportunities. **Bioresource Technology**. 2019.

ZILLI, R. P. **Influência do tempo de retenção hidráulica e da velocidade superficial do ar no desempenho de um reator de leito móvel com biofilme aderido (MBBR)**.

Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 39. 2013.